

**Proyecto de Mejora del Plan de Mantenimiento de las Islas de Combustible**  
**Ubicadas en la Mina de Carbones del Cerrejón Limited**

**HÉCTOR GABRIEL ANGULO CORONEL**



**Universidad de la Costa CUC**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Programa de Ingeniería Eléctrica**  
**Barranquilla**

**2017**

**Proyecto de Mejora del Plan de Mantenimiento de las Islas de Combustible  
Ubicadas en la Mina de Carbones del Cerrejón Limited**

**HÉCTOR GABRIEL ANGULO CORONEL**

**Trabajo para optar el título de Ingeniero Eléctrico**

**PhD. HERNÁN HERNÁNDEZ HERRERA**

**PhD. VLADIMIR SOUSA SANTOS**

**Tutores**

**Universidad de la Costa CUC**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Eléctrica**

**Barranquilla**

**2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Barranquilla, julio 13 de 2017**

## **Dedicatoria**

A Dios por guiarme y permitirme culminar mis estudios.

A mis padres, Héctor Angulo y Nurys Coronel, a mis hermanos Lauri y Dani por ese amor y apoyo incondicional.

A todos mis maestros, demás familiares y amigos que siempre me impulsaron a seguir en este proyecto.

## **Agradecimientos**

A Dios por dejarme vivir todas esas experiencias al momento de desarrollar este proyecto.

Al personal de Mantenimiento Industrial y de instalaciones de la empresa Carbones del Cerrejón Limited, por brindarme sus espacios para aprender y crecer como profesional.

A los Ingenieros Jorge Molina y José Reinaldo Quiroga por toda la información suministrada.

A los Ingenieros Hernán Hernández y Vladimir Sousa por sus asesorías y enseñanzas para hacer este proyecto.

A mi familia por siempre estar a mi lado dándome mucho amor y apoyo para realizar este proyecto.

## **Resumen**

En este trabajo se presenta una guía para mejorar el plan de mantenimiento de los equipos de las islas de combustible, ubicadas en el complejo carbonífero de la empresa Carbones del Cerrejón Limited. Inicialmente se realiza una descripción de los distintos tipos de mantenimientos y sus metodologías, para luego introducir los conceptos de la metodología propuesta para implementar en las instalaciones de las islas de combustible. También se describen la historia de la empresa, áreas que la conforman, su estructura y proceso productivo. Para llevar a cabo la mejora del plan de mantenimiento de dichas instalaciones, se siguen los pasos que denota la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), para así demostrar por qué se debe implementar la mejora del proceso actual llevado en el área de mantenimiento industrial del complejo. Como resultado del análisis, se recomienda tomar medidas administrativas y operativas para así tener a las islas de combustible con un alto índice de confiabilidad dentro del proceso productivo en Cerrejón. Se recomienda, además, generalizar e implementar la metodología al resto de instalaciones y equipos asociados.

**Palabras clave:** RCM, Mantenimiento, Modos de fallas, Criticidad, Confiabilidad, Minería.

### **Abstract**

This paper presents a guide to improve the maintenance plan of the fuel islands equipment, located in the coal mine complex of the company “Carbones del Cerrejón Limited”. Initially, a brief description of the different types of maintenance and their methodologies, and then the introduction of the concepts will be used with the new methodology implemented in the facilities of the fuel islands. Then a description of the history of the company, areas, and its structure and production process is performed. In order to carry out the improvement of the maintenance plan in the facilities, the steps of the methodology of reliability centered maintenance (RCM), are followed, in order to demonstrate the need to implement the optimization and improvement of the current process carried out in the Industrial maintenance area of the complex. As a result of the analysis, it is recommended to take administrative and operational measures in order to have the fuel islands with a high index of reliability within the mining process in “Cerrejón”. In addition, it is advisable to generalize and implement the methodology to other facilities and associated equipment.

**Keywords:** RCM, Maintenance, Failure Modes, Criticality, Reliability, Mining.

## Glosario

**Calidad:** Grado en el que un conjunto de características inherentes a un objeto (producto, servicio, proceso, persona, organización, sistema o recurso) cumple con los requisitos.

**Carbón Térmico:** Una roca sedimentaria que está compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Es un mineral negro y brillante, formado a partir de la vegetación consolidada entre los estratos de roca, que fue alterada por los efectos combinados de presión y calor durante millones de años. Es una de las principales fuentes para la producción de energía y además se convierte también en un combustible esencial para la producción de acero y otras actividades industriales.

**Confiabilidad:** La capacidad de un activo o componente para realizar una función requerida bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado.

**Estéril:** Suelo infértil el cual es retirado y dispuesto en los botaderos o escombreras dentro del proceso de explotación minera.

**Factibilidad:** La evaluación de un proyecto propuesto, la viabilidad de su logro y el diseño, las implicaciones financieras, económicas, sociales y ambientales.

**Isla de combustible:** Estación de servicio que provee combustible, lubricantes y nitrógeno a los equipos mineros y auxiliares de una mina.

**Overhauls:** Acto de desmantelamiento, reacondicionamiento, renovación y / o sustitución de componentes o subconjuntos de un equipo en preparación para el funcionamiento continuo hasta la siguiente inspección o revisión programada de acuerdo con las directrices del fabricante.



## Proyecto de mejora del plan de mantenimiento de las islas de combustible

**Patín:** Base en la cual reposan varios objetos o equipos los cuales son utilizados en procesos industriales que requieren ser trasladados de sitio. Estas Bases de apoyan sobre unos esquíes lo cual facilita arrastrarlo sobre distintos terrenos.

**SAE:** (Sociedad de Ingenieros de Automoción) Asociación global de más de 128.000 ingenieros y expertos técnicos relacionados en las industrias aeroespacial, automotriz y vehículos comerciales. El principal objetivo de la sociedad es el desarrollo de los estándares para todos los tipos de vehículos, incluyendo coches, camiones, barcos, aviones, etc.

**Tajo:** Una excavación o corte realizado en la superficie del suelo con el fin de extraer el mineral y que está abierto a la superficie durante la duración de la vida de la mina.

## Contenido

Lista de tablas y figuras .....	xii
Introducción .....	1
Planteamiento del problema .....	5
Justificación .....	6
Objetivos.....	7
Objetivo general .....	7
Objetivos específicos .....	7
1.    Capítulo 1 .....	8
1.1    Tipos de mantenimiento .....	8
1.1.1    Mantenimiento correctivo. ....	8
1.1.2    Mantenimiento preventivo. ....	12
1.1.3    Mantenimiento predictivo. ....	14
1.1.4    Mantenimiento productivo total. ....	23
1.1.5    Mantenimiento centrado en la confiabilidad. ....	28
2.    Capítulo 2 .....	40
2.1    Generalidades de la empresa Carbones del Cerrejón Limited .....	40
2.2    Reseña histórica de la empresa .....	41
2.3    Descripción de la empresa .....	42
2.4    Islas de combustible portátiles .....	42
2.4.1    Sistema de lubricación. ....	44

2.4.2	Sistema de combustible.....	46
2.4.3	Sistema de aire comprimido.....	47
2.4.4	Sistema eléctrico de alimentación.....	48
2.5	Estructura Funcional de equipos .....	48
3.	Capítulo 3 .....	50
3.1	Isla de Combustible Portátil # 1 .....	50
3.2	Descripción del Proceso .....	51
3.3	Árbol Jerárquico de Equipos .....	53
3.4	Caracterización del Sistema de Mantenimiento Actual .....	57
3.5	Preparación para Implementación de RCM .....	57
3.5.1	Análisis de Criticidad.....	59
3.5.2	Análisis Funcional, Modos y Efectos de Fallas. ....	63
3.5.3	Tareas Proactivas e Intervalos de Labores y Acciones por Defecto. ....	67
4.	Conclusión.....	71
5.	Recomendaciones.....	72
	Referencias .....	73
	Bibliografía.....	78

## Lista de tablas y figuras

### Tablas

Tabla 1.1 Criterios de Criticidad .....	35
Tabla 2.1 Tipos de lubricantes.....	44
Tabla 3.1 Listado de Equipos .....	50
Tabla 3.2 Árbol jerárquico.....	54
Tabla 3.3 Analisis de Criticidad. ....	60
Tabla 3.4 Hoja de Datos .....	62
Tabla 3.5 Funciones, fallas funcionales, modos y efectos de falla.....	63
Tabla 3.6 Hoja de Decision RCM 2 .....	70

### Figuras

Figura 1.1 Toma de muestra de lubricante. Macallister. (2016).....	16
Figura 1.2 Termograma de un motor. Insatec electrónica. (2017) .....	17
Figura 1.3 Fotografía de campo de motor. Insatec electrónica. (2017).....	17
Figura 1.4 Inspección por ultrasonido. Seractivos. (2016).....	18
Figura 1.5 Inspección mediante partículas magnéticas. IRAI. (2017) .....	19
Figura 1.6 Inspección Radiográfica. EDICSA. (2011).....	20
Figura 1.7 Proceso de inspección por líquidos penetrantes. NTC. (2017) .....	21
Figura 1.8 Análisis de vibración, Global Strategies Solutions. (2014) .....	22
Figura 1.9 Pilares del TPM, Editora microbyte. (2011) .....	24
Figura 1.10 Las 5S. Angulo H. (2017) .....	25
Figura 1.11 Flujograma de decisión, Ams group. (2010).....	31

Figura 1.12 Probabilidades de falla vs. Tiempo, Smith & Hinchcliffe. (2004).....	33
Figura 1.13 Matriz de criticidad, Pemex. (2012).....	37
Figura 1.14 Probabilidad condicional de falla, Ams group. (2010) .....	38
Figura 1.15 Acciones por defecto, Ams group. (2010) .....	39
Figura 2.1 Área del complejo minero Cerrejón, DigitalGlobe & Angulo H. (2017) .....	42
Figura 2.2 Instalaciones de la isla de combustible, Angulo H. (2016).....	43
Figura 2.3 Vista en planta isla de combustible, Cerrejón. 2012 .....	43
Figura 2.4 Vista isométrica de patín de lubricación, Cerrejón. (2012) .....	45
Figura 2.5 Patín de lubricación, Angulo H. (2016) .....	45
Figura 2.6 Conjunto motor-bomba despacho combustible, Angulo H. (2016) .....	46
Figura 2.7 Patín recibo combustible, Angulo H. (2016) .....	46
Figura 2.8 Compresor, Angulo H. (2016) .....	47
Figura 2.9 Bomba Neumática, Angulo H. (2016) .....	47
Figura 2.10 Transferencia automática, Angulo H. (2016).....	48
Figura 2.11 Motogenerador, Angulo H. (2016).....	48
Figura 2.12 Estructura funcional, ISO14224. (2016) .....	49
Figura 3.1 Flujograma del proceso, Angulo H. (2017) .....	53
Figura 3.2 Diagrama de Decisión RCM 2, Moubray. (1997).....	69

## **Introducción**

La historia del mantenimiento acompaña el desarrollo técnico industrial de la humanidad. Su objetivo general es conservar todos los activos que componen los eslabones de un sistema productivo, en las mejores condiciones de funcionamiento, con un buen nivel de confiabilidad, calidad y al menor costo posible (Torres, 2005, p. 17).

Este surge a finales del siglo XIX con el desarrollo de la mecanización industrial, producto a la necesidad de las primeras reparaciones. Con la llegada de la Primera Guerra Mundial y con la implantación de la producción en serie instituida por Ford, las fábricas pasaron a establecer programas de producción continuos que derivaron en la necesidad de formar equipos de trabajadores que pudiesen efectuar reparaciones a las roturas de las máquinas en servicio en el menor tiempo posible. Así surgió un grupo subordinado cuyo objetivo era la ejecución de estos trabajos, hoy conocido como “Mantenimiento Correctivo”; esta situación se mantuvo hasta finales de la década de 1930. Con el inicio de la Segunda Guerra Mundial junto con la industria bélica, sobre todo de la aviación y la necesidad de aumentar los regímenes de producción, los altos mandos administrativos pasaron a preocuparse, no solo de corregir las fallas, sino también de evitar que las mismas ocurriesen, razón por la cual el personal técnico de mantenimiento pasó a desarrollar el proceso de prevención de averías denominado “Mantenimiento Preventivo” (Tavares, 2000, cap. 1).

Alrededor del año 1950, con el desarrollo de la industria para satisfacer los esfuerzos de la posguerra, la evolución de la aviación comercial y la industria electrónica, los gerentes de mantenimiento observaron que el tiempo empleado para diagnosticar fallas era mayor que el tiempo de ejecución de la reparación, por ello crearon grupos de especialistas, cuyas funciones eran planificar y controlar el mantenimiento preventivo analizando causas y efectos

de cada falla, surgiendo así la Ingeniería de Mantenimiento (Baldini, Furlentto, Roversi, & Turco, 1975).

Varios años más tarde, en 1966, con la difusión de las computadoras, el fortalecimiento de las Asociaciones Nacionales de Mantenimiento creadas en la década anterior, la sofisticación de elementos de medición e instrumentos de protección y los altos costos que implicaba el mantenimiento preventivo, la Ingeniería de Mantenimiento pasó a desarrollar criterios de predicción o previsión de fallas, con el objetivo de optimizar el desempeño de los grupos de trabajo de mantenimiento. Los criterios conocidos como Mantenimiento Predictivo o Previsivo, fueron asociados a métodos de planificación y control de mantenimiento automatizados, reduciendo las tareas de los ejecutantes de los mantenimientos. Estas actividades ocasionaron que el grupo de Ingeniería de Mantenimiento pasara a tener dos funciones: el de estudio de fallas crónicas y el de planificación y control de mantenimiento (PCM), este último para desarrollar, implementar y analizar los resultados de los sistemas automatizados de mantenimiento.

En la década de 1980, la industria de la mayoría de los países occidentales tenía como objetivo obtener el máximo de rentabilidad para una inversión dada. Sin embargo, con la penetración de la industria oriental en el mercado occidental, el consumidor pasó a ser considerado un elemento importante en las adquisiciones, exigiendo la calidad de los productos o servicios suministrados. Esta demanda hizo que las empresas considerasen el factor de calidad para mantenerse competitivas.

Con el desarrollo de las computadoras personales a costos reducidos y con lenguaje simple, los órganos de mantenimiento pasaron a desarrollar y procesar sus propios programas, eliminando inconvenientes de la dependencia de disponibilidad humana y de equipos para

atender las prioridades de procesamiento de la información a través de un computador central. Esta actividad de planificación y control de mantenimiento se volvió tan importante en ciertas empresas, que pasó a convertirse en un órgano de asesoramiento directo a la supervisión general de la producción e influir directamente sobre la operación.(Tavares, 2000, cap. 1)

Al mismo tiempo, en la industria de aviación civil se venía avanzando en la preparación de programas de mantenimiento para aeronaves, creando como resultado el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Nowlan y Heap, entre los años 1983 y 1990, desarrollaron la metodología y diagrama de decisión para ser luego aplicada en la industria minera y manufacturera teniendo leves modificaciones. Para el año 1991, el RCM se aplicó en más de 1000 plantas en 41 países, donde se desarrollaron desde proyectos hasta capacitaciones para la implementación de estas prácticas a todos los niveles. Los sectores en los cuales se llevaron a cabo los proyectos alcanzaron casi todos los campos del esfuerzo humano. Estos incluyen fábricas, petroquímicas, servicios públicos, transporte masivo, construcciones y complejos mineros (Moubray, 1997, cap. 1). Actualmente esta metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad se aplica en todos los sectores de la industria, siendo una forma tecnológica de gestionar los procesos de mantenimiento.

El mantenimiento de un complejo minero industrial es un pilar fundamental para garantizar la competitividad de las empresas. Hoy en día las empresas requieren que la gestión de mantenimiento garantice la disponibilidad de los equipos a un costo razonable con seguridad y cuidado del medio ambiente.

Las islas de combustible pertenecientes al departamento de producción de la empresa Carbones del Cerrejón Limited, son un área importante en la cadena para la explotación y exportación del carbón. El área de mantenimiento industrial de la empresa en la actualidad



presenta la necesidad de ser más eficiente ante sus clientes, y por eso debe tener altos indicadores de desempeño en todas sus áreas de influencia. Una de estas áreas son las ya mencionadas islas las cuales necesitan tener un plan de mantenimiento actualizado y adecuado para que la empresa cumpla con los indicadores de productividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se propone una solución orientada a mejorar los indicadores de mantenimiento y tener todas las áreas de la mina en condiciones óptimas de operación, para garantizar la exportación del mineral sin contratiempos. Esta solución se dará mediante la utilización de metodologías de mantenimiento centradas en la confiabilidad de las islas de combustibles del complejo carbonífero.

### **Planteamiento del problema**

El proceso de producción minera en Carbones del Cerrejón Limited es continuo y requiere la mayor eficiencia posible en la ejecución de sus actividades. Los equipos de acarreo de carbón y estéril, deben cumplir con unos indicadores de productividad asociados a la tonelada de material transportado, con el menor tiempo de interrupción posible. Para esto, se cuentan con estrategias de planeación de trabajos las cuales consideran unos tiempos para el abastecimiento de combustible, lubricantes y nitrógeno para las llantas en las islas de combustibles. Estas islas se sitúan estratégicamente a lo largo de la mina, de manera que los equipos mineros no tengan que transportarse largas distancias para reabastecerse.

En la actualidad, las islas de combustibles no tienen un plan de mantenimiento adecuado, ya que estas aparecen integradas como un solo equipo dentro del software de gestión de activos en la compañía. Esto implica que no exista un árbol jerárquico de equipos individualizados de acuerdo con su funcionalidad en el sistema y no se caracterizan los modos de fallas asociados a cada equipo para definir unas tareas de mantenimiento que garanticen una alta confiabilidad en el funcionamiento de las islas de combustible. Esto último reflejaría un ahorro de costos en la operación. De acuerdo con lo anterior, el problema tratado en este trabajo es el siguiente:

¿Es posible mejorar el plan de mantenimiento existente a los sistemas instalados en las islas de combustible de la empresa Cerrejón para brindarle mayor confiabilidad?

### **Justificación**

Una empresa como Carbones del Cerrejón, requiere de cambios constantes a medida que avanzan y se desarrollan los procesos de minería. Debido a esto, la empresa tiene un gran desarrollo de proyectos y estrategias para que la minería no se detenga y siga operando las 24 horas del día y los 364 días al año con mayor eficiencia y productividad.

Con el desarrollo de este proyecto, se busca proponer al personal administrativo de mantenimiento industrial del complejo minero de Cerrejón, una mejora en el plan de mantenimiento actual que permita aumentar la disponibilidad y disminuir los costos en las instalaciones de las islas de combustible, aumentando la productividad y logrando que la explotación y exportación del carbón sea segura para las personas y el medio ambiente.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Desarrollar una guía basada en la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para mejorar el plan de mantenimiento de los equipos de las islas de combustible, del complejo carbonífero de la empresa Carbones del Cerrejón Limited.

### **Objetivos específicos**

Analizar los tipos de mantenimientos que se aplican actualmente en las instalaciones de las islas de combustibles.

Caracterizar el estado actual de la operación de una de las Isla de combustible objeto de estudio y los equipos que la componen.

Determinar los modos de fallas más frecuentes en los equipos que operan en las islas.

Desarrollar los pasos de la guía basada en la metodología RCM según las características de las islas de combustible.

## Capítulo 1

### 1.1 Tipos de mantenimiento

#### 1.1.1 Mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo es la intervención necesaria para poder solucionar o reparar un defecto o falla ya ocurrida. Estas averías son resueltas por el personal de mantenimiento acudiendo en muchas ocasiones al llamado del propio usuario de las máquinas o equipo. El principal inconveniente que presenta este tipo de mantenimiento es que se detecta la avería en el momento que el equipo está siendo utilizado (Torres, 2005, p. 123).

Las características de un mantenimiento correctivo son:

- Está basado en la intervención rápida, después de ocurrida la avería.
- Conlleva discontinuidad en los flujos de producción y logísticos.
- Tiene una gran incidencia en los costos de mantenimiento por producción no efectuada.
- Tiene un bajo nivel de organización.
- Se denomina también mantenimiento accidental.

Los pasos a seguir para realizar un mantenimiento correctivo son (Garrido, 2010, p. 100):

El **tiempo de detección**, el cual es el tiempo que transcurre entre el origen del problema y su detección. Es posible reducir este tiempo si se desarrollan sistemas que permitan detectar fallos en su fase inicial, como inspecciones rutinarias diarias, comprobación de parámetros de funcionamiento, y formación o capacitación adecuada del personal de producción.

El siguiente paso es, el **tiempo de comunicación**, el cual es el que transcurre entre la detección del problema y localización del personal de mantenimiento. Este periodo se ve afectado por los sistemas de comunicación e información, aunque con una buena organización

del sistema de mantenimiento hará que este tiempo sea más corto. Para reducir el tiempo debe existir un sistema de comunicación ágil, que implique al menor número de personas posible, y debe disponerse de medios que permitan comunicarse rápidamente como, por ejemplo, teléfonos móviles, radios portátiles, etc.

El **tiempo de espera** es el siguiente paso, es el que transcurre luego de la comunicación de la avería hasta el inicio de la reparación. Incluye el tiempo de espera hasta disponer de operarios que puedan atender la incidencia, los trámites administrativos necesarios para poder intervenir (parada de los equipos, solicitud de órdenes de trabajo, obtención del permiso de trabajo, aislamiento del equipo, etc.) y el traslado del personal hasta el lugar donde se ha producido el incidente. Es posible reducir este tiempo si se dispone de una plantilla adecuadamente dimensionada, si se dispone de un sistema ágil de gestión de órdenes, de obtención de permisos de trabajo, y si la distancia del taller hasta los equipos es mínima.

El paso siguiente, **diagnóstico de la avería**, es el tiempo necesario para que el operario de mantenimiento determine que está ocurriendo en el equipo y como solucionarlo. Este tiempo se ve afectado por varios factores: formación y experiencia del personal, y por la calidad de la documentación técnica disponible como planos, históricos de averías, listas de averías y soluciones, etc. Es posible reducir este tiempo si se dispone de planos y manuales en las proximidades de los equipos y si se elaboran listas de averías en las que se detallen síntoma, causas y solución de las averías que se han producido en el pasado.

**Acopio de herramientas y medios técnicos necesarios.** Una vez determinada la intervención necesaria, el personal encargado de la reparación puede necesitar un tiempo para situar los medios que necesite. Este tiempo suele verse afectado por la distancia de los talleres o lugares de almacenamiento de las herramientas al lugar de intervención, por la previsión de

los operarios a la hora de llevar consigo el herramental que creen puedan necesitar y por la cantidad de medios disponibles en la planta. Para reducir este tiempo, es conveniente situar adecuadamente los talleres, acudir a las averías portando una caja de herramientas estándar, y dotando el taller con los medios que puedan ser necesarias según el tipo de equipos que tenga la planta.

**Acopio de repuestos y materiales.** Es el tiempo que transcurre hasta la llegada del material que se necesita para realizar la intervención. Incluye el tiempo necesario para localizar el repuesto en el almacén (en el caso de tenerlo en stock), realizar los pedidos pertinentes (en caso de no tenerlo) y que el proveedor los sitúe en la planta para acondicionarlos (en caso de que haya que realizar algún trabajo previo), para verificar que alcanzan sus especificaciones y para situarlos en el lugar de utilización. Este tiempo se ve afectado por la cantidad de material que haya en stock, por la organización del almacén, por la agilidad del departamento de compras, y por la calidad de los proveedores. Para optimizar este tiempo, se debe tener un almacén adecuadamente dimensionado con una organización eficiente, un servicio de compras rápido, y contar con unos proveedores de calidad y vocación de servicio.

Luego sigue la **Reparación de la avería**. Es el tiempo necesario para que el equipo quede en disposición para producir. Se ve afectado por el alcance del problema y por los conocimientos y habilidad del personal encargado de su resolución. Para optimizar este tiempo es necesario disponer de un sistema de mantenimiento preventivo que evite averías de gran alcance, y disponer de un personal eficaz, motivado y muy bien formado.

**Pruebas funcionales.** Es el tiempo necesario para comprobar que el equipo ha quedado adecuadamente reparado. El tiempo empleado en realizar pruebas funcionales suele ser una

buena inversión; un equipo no debe entrar en servicio hasta que no se haya comprobado que alcanza todas sus condiciones. Para optimizar este tiempo es conveniente determinar cuáles son las mínimas pruebas que se deben realizar para comprobar que el equipo ha quedado en perfectas condiciones, y redactar protocolos o procedimientos en que se detalle claramente dichas pruebas.

**Puesta en servicio.** Es el tiempo que transcurre entre la solución completa de la avería y la puesta en servicio del equipo. Está afectado por la rapidez y agilidad de las comunicaciones. Para optimizarlo, igual que en el punto dos, es necesario disponer de sistemas de comunicación y administrativos eficaces que no supongan un obstáculo a la puesta en marcha de los equipos.

**Redacción de informes.** El sistema documental de mantenimiento debe recoger al menos los incidentes más importantes de la planta, con un análisis en el que se detallen los síntomas, la causa, la solución y las medidas preventivas adoptadas.

En relación al tiempo total de resolución de un incidente o avería, el tiempo de reparación solamente puede ocupar una pequeña parte, la Gestión de Mantenimiento influye decisivamente en este tiempo al menos siete de los diez tiempos anteriores se ven afectados por la organización del departamento (Garrido, 2010, p. 103).

Muy pocas empresas recogen y analizan los tiempos transcurridos en cada una de estas fases, por la complicación que supone diferenciar cada uno de estos tiempos. Sin embargo, tenerlo en cuenta ayuda a tomar acciones para reducir el tiempo medio de reparación de los equipos.

A continuación, se resume las ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo.

Ventajas:



- Requiere menor organización y planificación
- Requiere menor conocimiento
- Solo se gasta dinero cuando es necesario hacerlo.
- No genera gastos fijos.
- No se necesita una gran cantidad de operarios.

Desventajas:

- La producción se vuelve impredecible y poco fiable.
- Conlleva a discontinuidad en los flujos de producción.
- Gran incidencia en los costos por paradas de producción.
- Existe baja disponibilidad de la planta.
- Basar el mantenimiento en la corrección de fallos supone contar con técnicos muy calificados, con un stock de repuestos importantes y con medios técnicos muy variados.
- Costo incierto por lo que es difícil planificar el dinero que se utilizará en el mantenimiento.

### **1.1.2 Mantenimiento preventivo.**

El mantenimiento preventivo es la ejecución planificada de un sistema de inspecciones periódicas, cíclicas programadas de un servicio de trabajos de mantenimiento previsto como necesario, para aplicar a todas las instalaciones, máquinas o equipos, con el fin de disminuir los casos de emergencias y permitir un mayor tiempo de operación en forma continua (Torres, 2005, p. 130). Tiene como intención reducir al mínimo la probabilidad de falla, o evitar la degradación de los sistemas, máquinas y equipos de alguna instalación.

La base de la información para realizar el mantenimiento preventivo surge de fuentes internas y externas a la organización.

Las fuentes internas están constituidas por los registros o historiales de reparaciones existentes en la empresa. Estos informan sobre todas las tareas de mantenimiento que se han realizado en los equipos. Se debe tener en cuenta que los bienes existentes pudieron ser adquiridos como nuevos o como usados.

Forman parte de las fuentes internas los archivos de los equipos e instalaciones. Esto es, los listados de partes, especificaciones, planos generales, de detalle, de despiece, los archivos de inventarios de piezas y partes de repuesto y, los archivos del personal disponible en mantenimiento con el detalle de su calificación, habilidades, horarios de trabajo, sueldos, etc.

Las fuentes externas están constituidas por las recomendaciones sobre el mantenimiento, que brinda el fabricante de cada equipo. Vale destacar que estas pueden variar entre los diferentes fabricantes para equipos similares.

A continuación, se resume las ventajas y desventajas del mantenimiento preventivo.

Ventajas:

- Disminuye desde cualquier punto de vista la posibilidad de paros inesperados.
- Disminuye el tipo de riesgo por fallas.
- Permite llevar un mejor control y planeación en el mantenimiento que se aplicará a los equipos.
- Se hace correctamente, teniendo conocimiento de las máquinas y un tratamiento que ayudará a controlar la maquinaria.
- Permite costos más económicos al momento de realizar el mantenimiento.

Desventajas:

- Cuando se realizan en los mantenimientos cambios de componentes se desconoce el estado de ellos al momento de ser intervenidos.
- En caso de que no se haga un correcto análisis los tiempos para realizar el mantenimiento pueden incurrir en costos muy elevados o que puedan aparecer fallas imprevistas.

### **1.1.3 Mantenimiento predictivo.**

El mantenimiento predictivo ha sido un complemento fundamental del mantenimiento preventivo y correctivo. Este mantenimiento es basado en la utilización de equipos y herramientas de diagnóstico para el análisis de fallas.

Este mantenimiento tiene como concepto básico, el conjunto de actividades, programadas para detectar las fallas de los equipos antes que sucedan, a través del uso de instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas. Para lograr esto requiere de tecnologías y personal capacitado integrando todos los indicadores disponibles de la condición de los equipos, datos de diagnóstico, rendimiento, registro de datos del operador, históricos de mantenimiento y el conocimiento de diseño para tomar decisiones oportunas.

Los objetivos del mantenimiento predictivo son:

- Conocer el estado en que se encuentran los elementos críticos de los equipos mediante una monitorización de los mismos.
- Intervenir en un equipo cuando una vez procesada la información monitorizada se determine que un elemento ha alcanzado el máximo de su vida útil.
- Establecer tendencias en el tiempo de los fallos que se empiezan a desarrollar, lo que permite establecer con precisión las operaciones de mantenimiento. En caso de ser

posible, se pueden planificar de tal manera que coincidan con paros programados de la planta.

Entre las ventajas de mantenimiento predictivo se encuentra la reducción de los tiempos muertos, de los inventarios, de tiempos extras, de compras de piezas emergentes; lo cual se refleja en un mayor rendimiento de los presupuestos hechos, principalmente a los departamentos encargados de mantenimiento.

**1.1.3.1 Técnicas de mantenimiento predictivo.** Las técnicas utilizadas para el mantenimiento predictivo se dividen en directas e indirectas. En las directas se inspeccionan directamente los elementos sujetos a fallo, mediante la inspección visual, ultrasonidos, radiografías y también inspección por líquidos penetrantes. Las técnicas indirectas se hacen mediante la medida y análisis de algún parámetro con una significación funcional relevante, como, análisis de vibraciones, análisis de ruidos, impulsos de choque y análisis a los lubricantes (De León, 1998, p. 121).

Algunas técnicas de mantenimiento son:

**1.1.3.1.1 Análisis de lubricantes.** En el análisis de aceite se comparan los lubricantes usados con los nuevos, este último nos brinda una línea base para determinar los aspectos siguientes:

- Las condiciones del lubricante.
- La presencia de contaminantes.
- Las condiciones de las superficies de desgaste.

A esos lubricantes se le toman muestras y se le hacen análisis físico-químicos, como la acidez, alcalinidad, olor, color, corrosión al cobre, punto de anilina y viscosidad. También se

le hace conteo de partículas por medio de espectrofotometrías por emisión atómica, ferrografía directa y analítica (ver figura 1).



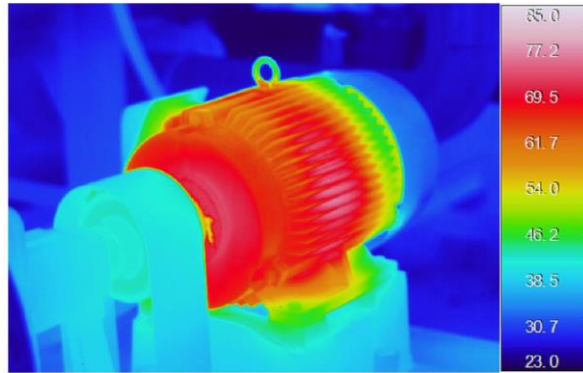
*Figura 1.* Toma de muestra de lubricante. MacAllister. 2016. Recuperado de <https://www.macallister.com/parts-service/service-solutions/>

*1.1.3.1.2 Termografía.* Es una técnica que se aplica mediante cámaras sensibles que captan la energía infrarroja irradiada de la superficie del equipo, producto a su temperatura, y la convierte en una medida equivalente, una imagen visible llamada termograma que representa un color diferente o un nivel de escala para cada nivel de energía.

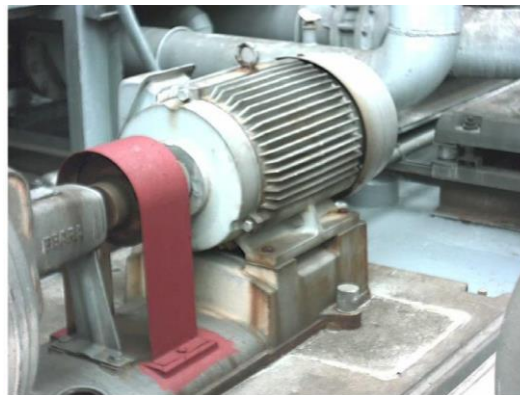
La imagen térmica es útil para su aplicación en Mantenimiento Predictivo, fundamentalmente en las siguientes aplicaciones:

- Identifica los componentes mecánicos y eléctricos que están “más calientes” que lo normal, frecuentemente es una indicación de falla inminente.
- Indica la pérdida excesiva de calor, que usualmente es un signo de aislamiento incorrecto o inadecuado.

Las aplicaciones de la termografía infrarroja ayudan a inspeccionar conductos con fluidos calientes o fríos para localizar obstrucciones, exploración de componentes mecánicos en busca de calor excesivo, sistemas de vapor por pérdidas y aislamientos y también exploración de equipos eléctricos con conexiones flojas o en condiciones de sobrecarga (Fernández, Garcia, Alonso, Cano, & Solares, 1998, cap. 3). (Ver Figura 2 y 3).



*Figura 2.* Termograma de un motor. Insatec electrónica. 2017. Recuperado de [http://www.camarastermograficas.es/tig\\_023.htm](http://www.camarastermograficas.es/tig_023.htm)



*Figura 3.* Fotografía de campo de motor. Insatec electrónica. 2017. Recuperado de [http://www.camarastermograficas.es/tig\\_023.htm](http://www.camarastermograficas.es/tig_023.htm)

*1.1.3.1.3 Inspección por ultrasonido.* Consiste en la captación del sonido emitido por diferentes fuentes cuya frecuencia está por encima de 20 KHz, que es el valor máximo de captación del oído humano. Casi todas las fricciones mecánicas, arcos eléctricos y fugas de presión o vacío producen ultrasonido en un rango aproximado a los 40 KHz. Estas son las frecuencias con características aprovechables en el mantenimiento predictivo, puesto que al tener las ondas sonoras de corta longitud el ruido ambiental, por más intenso que sea, no interfiere en la detección del ultrasonido (ver figura 4). La alta direccionalidad del ultrasonido en 40 KHz permite con rapidez y precisión la ubicación de una falla. También se puede utilizar las vibraciones mecánicas ultrasónicas de alta frecuencia para determinar discontinuidades en los elementos (F. J. G. Fernández, 2005, cap. 5). La inspección por ultrasonido permite:

- Detección de fricción en máquinas rotativas.
- Detección de fallas y/o fugas en válvulas.
- Detección de fugas de fluidos.
- Detección de arco eléctrico.



*Figura 4.* Inspección por ultrasonido. Seractivos. 2016. Recuperado de [http://gerencia.seractivos.com/2016/08/18/la-cultura-del-mantenimiento-autonomo/#.WWpZEIg1\\_IU](http://gerencia.seractivos.com/2016/08/18/la-cultura-del-mantenimiento-autonomo/#.WWpZEIg1_IU)

*1.1.3.1.4 Inspección mediante partículas magnéticas.* La inspección mediante partículas magnéticas es una técnica utilizada para la detección de discontinuidades en materiales magnéticos, con el objetivo de detectar grietas u otros defectos superficiales, (ver figura 5) pero también se puede utilizar para detectar discontinuidades superficiales. Su uso está limitado a los materiales ferromagnéticos, no en los aceros inoxidables austeníticos, cobre, aluminio u otros metales no ferromagnéticos.



*Figura 5.* Inspección mediante partículas magnéticas. IRAI. 2017. Recuperado de <http://iarisureste.com/servicio-s-pnd/#1493850855341-1581452b-36a6>



*1.1.3.1.5 Inspección por radiografía.* La inspección radiográfica es una técnica de ensayo no destructivo que utiliza la energía irradiada en formas de rayos X o Gamma, transmitida a través del cuerpo a ensayar. Para ello se coloca una fuente de radiación ionizante en un lado del componente y una película radiográfica encerrada dentro de un contenedor a prueba de luz, en el lado opuesto del componente en relación con la fuente de radiación como se muestra en la Figura 6. Después de un período de tiempo calculado, la fuente de radiación se quita y la película se procesa químicamente para revelar el estado de la estructura (F. J. G. Fernández, 2005, cap. 5).

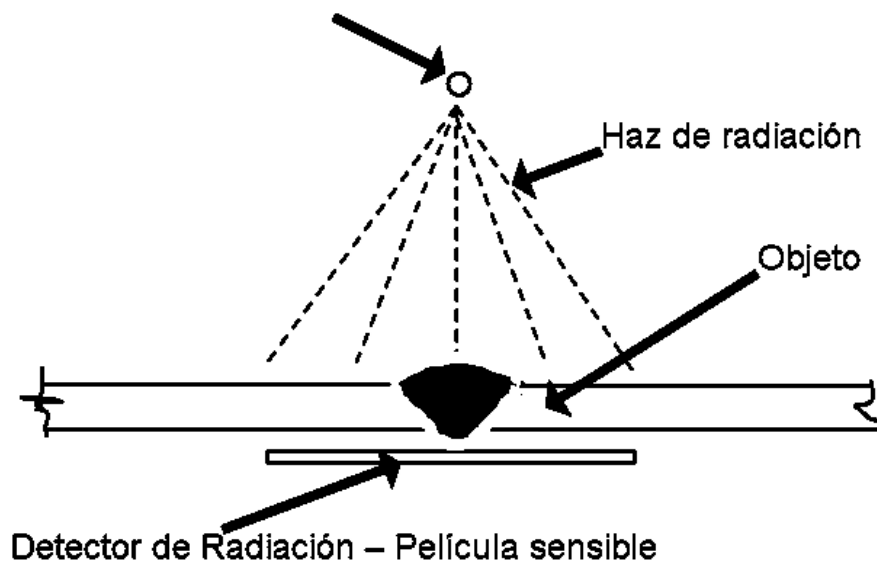


Figura 6. Inspección Radiográfica. EDICSA. 2011. Recuperado de [http://www.endicsa.com.ar/site/images/imagenes\\_articulos\\_endicsa/rt1.jpg](http://www.endicsa.com.ar/site/images/imagenes_articulos_endicsa/rt1.jpg)

La radiografía convencional se ha ido con el tiempo sustituyendo por la digital, en este tipo existen 2 métodos: La placa de fosforo fotoestimulable la cual es una placa meta estable la cual se utiliza junto con la tecnología de radiografía computarizada digital. El otro método

es el panel detector plano que permite realizar una radiografía proporcionando una imagen digital radiológica al instante.

*1.1.3.1.6 Inspección mediante líquidos penetrantes.* La inspección por líquidos penetrantes, también denominada control capilar, es un método versátil capaz de localizar grietas, porosidad y solapamientos que están abiertos a la superficie. El método se basa en la capacidad del líquido penetrante de introducirse en la discontinuidad. Cuando el objeto se limpia, el líquido permanece en la discontinuidad, pero puede extraerse mediante un revelador en forma de polvo fino, que actúa como un material secante. El líquido penetrante se muestra teniendo como fondo el revelador, lo que proporciona una indicación de la discontinuidad sobre la superficie (M. Fernández et al., 1998, cap. 5). (Ver Figura 7)

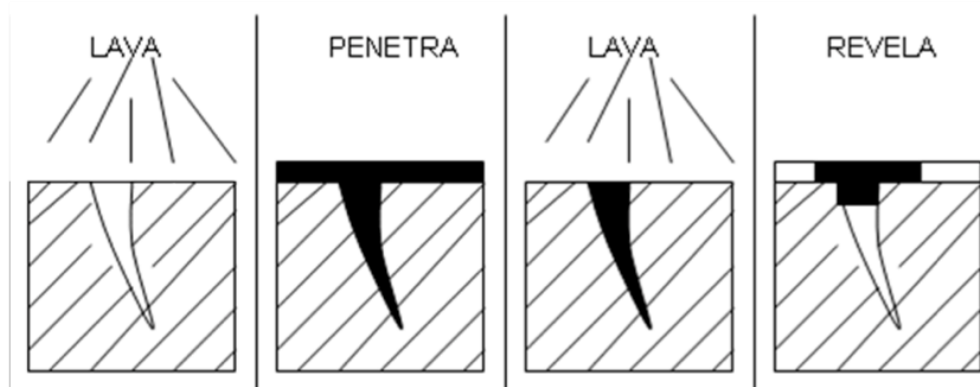


Figura 7. Proceso de inspección por líquidos penetrantes. NTC. 2017. Recuperado de [http://www.nihontecnocrane.com.mx/wpcontent/uploads/2014/04/liq\\_01.png](http://www.nihontecnocrane.com.mx/wpcontent/uploads/2014/04/liq_01.png)

*1.1.3.1.7 Análisis de vibración.* Las vibraciones son movimientos periódicos que se producen con todas sus características en un intervalo de tiempo denominado período, producidas por los cambios constantes de una fuerza que modifica continuamente su dirección e intensidad. Las características de la vibración que se mide con más frecuencia son:

- La amplitud: su nivel máximo nos revela la intensidad de las vibraciones presentes e indican hasta qué grado son buenas o malas las condiciones de la máquina.
- La frecuencia: nos revela la causa que origina la falla, y, por tanto, es la característica más importante de las mediciones.
- La fase: nos indica el tiempo de adelanto o retraso que tiene una onda vibratoria respecto a otra de igual período o con respecto a una marca de referencia.

El diagnóstico de averías está en la diferenciación de problemas mecánicos que se manifiestan espectralmente de la misma forma, como son: el desequilibrio, la excentricidad, el eje deformado, la desalineación, las holguras, la falta de rigidez en la bancada y la resonancia armónica.



*Figura 8.* Análisis de vibración, Global Strategies Solutions. 2014. Recuperado de <http://globalstrategiessolutions.com/wp-content/uploads/2014/07/analisis-vibraciones.jpg>

#### **1.1.4 Mantenimiento productivo total.**

Tiene como concepto básico "la reformulación y la mejora de la estructura empresarial a partir de la reestructuración y mejora del nivel de capacitación de las personas y del desarrollo tecnológico los equipos", con el compromiso de todos los niveles jerárquicos y el cambio de la postura organizacional (Tavares, 2000, cap 6).

Con el mantenimiento productivo total o TPM se puede organizar un programa de mantenimiento preventivo con el fin de maximizar la efectividad de los bienes. El programa se centra en el factor humano de toda la planta, para lo cual se asignan tareas de mantenimiento a ser realizadas en pequeños grupos, mediante una conducción motivadora (Singh, Gohil, Shah, & Desai, 2013, pp. 592-599).

El TPM se basa en los siguientes principios como:

- Efectividad total a efectos de obtener la rentabilidad adecuada, teniendo en cuenta que esta hace referencia a la producción, a la calidad, al costo, al tiempo de entrega, a la moral, a la seguridad, a la salubridad y al ambiente.
- Sistema de mantenimiento total consistente en la prevención.
- Intervención autónoma del personal en tareas de mantenimiento.
- Mejoramiento permanente de los procesos al mejorar el mantenimiento.

El TPM se caracteriza, además, por las acciones de mantenimiento en todas las etapas del ciclo de vida del equipo, la participación amplia de todas las personas de la organización, por ser una estrategia global de empresa en lugar de un sistema para mantener equipos (Carnero & Gómez, 2017, pp. 255-272). El TPM también va orientado a la mejora de la efectividad global de las operaciones, en lugar de prestar atención a mantener los equipos funcionando y la

intervención significativa del personal involucrado en la operación y producción en el cuidado y conservación de los equipos y recursos físicos.

El TPM se sustenta en 8 pilares, como se observan en la siguiente Figura:

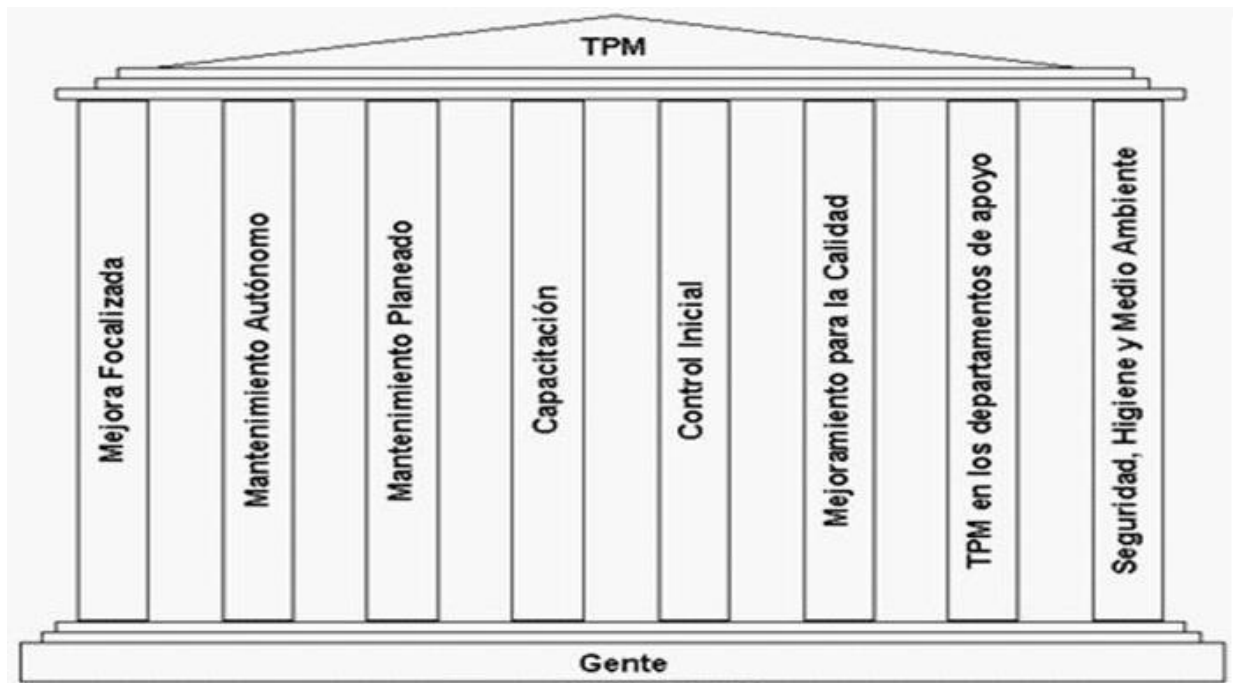


Figura 9. Pilares del TPM, Editora microbyte. 2011. Recuperado de <http://www.microbyte.cl/elec/picarti/201012/tpm2.gif>

- **Mejora Focalizada:** Son actividades que se desarrollan con la intervención de las diferentes áreas comprometidas en el proceso productivo, con el objetivo de maximizar la efectividad global de los equipos, a través de un trabajo organizado que centra su atención en la eliminación de las pérdidas que se presentan. Se trata de desarrollar el proceso de mejora continua PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar.) aplicando procedimientos y técnicas de mantenimiento.

- **Mantenimiento Autónomo:** el mantenimiento autónomo consiste en que cada operario sepa diagnosticar y prevenir las fallas eventuales de su equipo y de este modo prolongar la vida útil del mismo.

Una metodología para implantar la mayor cantidad de actividades de mantenimiento autónomo es utilizando las 5S (ver figura 10). Este es un modelo de productividad creado en Japón que hoy es aplicado en empresas occidentales. La metodología del orden y la limpieza que propone las 5S como medio para eliminar las pérdidas derivadas por la existencia del desorden y la suciedad, se compone por 5 etapas (Omogbai, 2017):

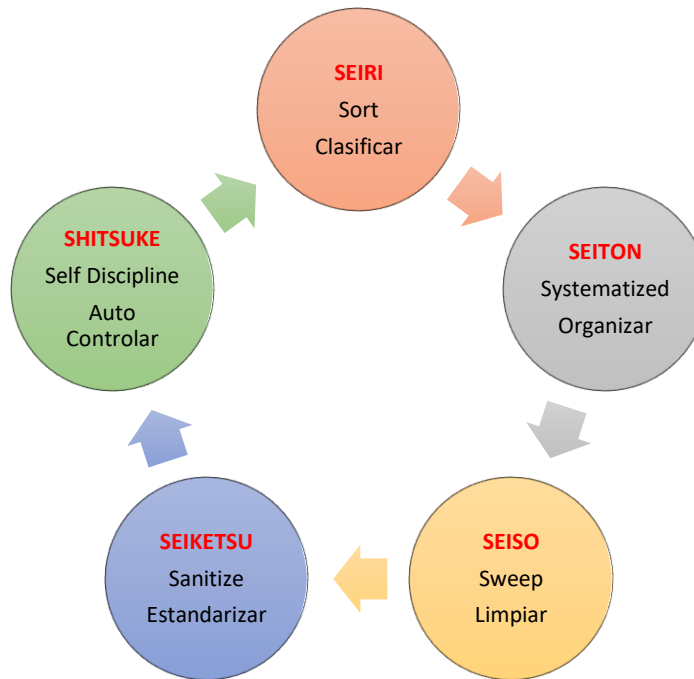


Figura 10. Las 5S. Angulo H. 2017. Adaptado de <http://dqsiberica.com/wp-content/uploads/2014/07/esquema-workshop-en-las-5s.jpg>

- **Seiri (Clasificar):** Consiste en la eliminación de todo lo innecesario, para ello se identifican los elementos necesarios en el puesto de trabajo y se eliminan todos los innecesarios.

- **Seiton (Organizar):** Consiste en ordenar e identificar convenientemente los elementos presentes en el área de trabajo de modo que estén listos para cuando se necesiten.
  - **Seiso (Limpiar):** Ordenar y mantener limpio el puesto de trabajo, las máquinas y las personas.
  - **Seiketsu (Estandarizar):** Consiste en el mantenimiento y mejora de los niveles de organización y limpieza, es decir desarrollar de manera continua las 3S anteriores.
  - **Shitsuke (Auto Controlar):** Consiste en la capacitación de los empleados para que cumplan con todo lo anterior.
- 
- **Capacitación:** En este pilar se busca planificar la capacitación de los operadores, mantenedores e ingenieros de producción (operación y mantenimiento) de forma que se puedan alcanzar los siguientes objetivos:
    - Realizar actividades de mantenimiento de forma espontánea (limpieza, lubricación, inspección, pequeños ajustes y medición)
    - Identificar, detectar y resolver problemas en los equipos; esto se logra comprendiendo su funcionamiento.
    - Entender la relación entre los mecanismos del equipo y la calidad del producto.
    - Capacidad para conservar el conocimiento y enseñar a otros compañeros.
  - **Control Inicial:** Consta básicamente en implementar lo aprendido en las máquinas y procesos nuevos. Desde este pilar se pretende reducir el deterioro de

los equipos actuales y mejorar los costos de su mantenimiento, así como incluir los equipos en proceso de adquisición para que su mantenimiento sea el mínimo.

También se pretende asegurar que los equipos de producción a emplear sean:

- Fiables
  - Fáciles de mantener
  - Fáciles de operar
  - Seguros
- **Mejoramiento para la Calidad:** La meta en este pilar es ofrecer un producto con cero defectos y que cumpla con las expectativas del cliente. Esto se logra con la continua búsqueda de una mejora y optimización de los equipos.
  - **TPM en los Departamentos de Apoyo:** En este pilar se quiere que todos los departamentos administrativos, de soporte o apoyo estén atentos a la metodología y procesos llevados en la implementación del TPM y finalmente implementen las mejoras.
  - **Seguridad, Higiene y Medio Ambiente:** En el último pilar lo importante es buscar que el ambiente de trabajo sea confortable y seguro, muchas veces ocurre que la contaminación en el ambiente de trabajo es producto del mal funcionamiento de los equipos, entre tanto, muchos de los accidentes son ocasionados por la mala distribución de los equipos y por herramientas en el área de trabajo. El objetivo de este pilar es crear y mantener un sistema que garantice un ambiente laboral sin accidentes y sin contaminación.

Las ventajas y desventajas del mantenimiento productivo total serían:

Ventajas:



- Al integrar a toda la organización en los trabajos de mantenimiento se consigue un resultado final más enriquecido y participativo.
- El concepto está unido con la idea de calidad total y mejora continua.

Desventajas:

- Requiere un cambio de cultura general y para que tenga éxito este cambio no puede ser introducido por imposición, requiere el convencimiento por parte de todos los componentes de la organización.
- La inversión en formación y cambios generales en la organización es costosa.
- El proceso de implementación requiere de muchos años.

#### **1.1.5 Mantenimiento centrado en la confiabilidad.**

El mantenimiento centrado en confiabilidad RCM, es la metodología que será empleada en la presente propuesta, por ser el más eficaz dentro de todos los tipos de mantenimiento.

RCM es una metodología de análisis en la cual se definen las tareas óptimas de mantenimiento necesarias para eliminar riesgos asociados a la materialización de modos de falla de los equipos y sistemas de las industrias y de ahí sus consecuencias. El RCM no es más que una forma lógica de identificar qué equipo en sus instalaciones debe mantenerse con base en mantenimientos predictivo, preventivos en lugar de un “Dejarlo fallar y luego arreglarlo” comúnmente denominado como “run to failure” (RTF).

En pocas palabras, el RCM se utiliza para determinar las tareas óptimas en una relación costo - beneficio, que aseguran que cualquier activo físico continúe funcionando en su contexto operacional presente.

Los primeros programas de mantenimiento se basaban en el concepto de reacondicionamiento periódico a gran escala o comúnmente denominado “Overhauls”, esto

para tener confiabilidad y seguridad. Pero estas prácticas aplicadas a los aviones de las aerolíneas comerciales fueron poco a poco tornándose insostenibles; en algunos casos actuaban negativamente en la confiabilidad debido a la probabilidad de fallas ocasionadas por los componentes reemplazados y sus fallas prematuras.

Nowlan y Heap encontraron en sus estudios que muchos componentes similares no se deterioran del mismo modo, ellos llegaron a demostrar que el 11% de los componentes mostraron un desgaste que llevó a su reemplazo dentro de un cierto periodo, es decir, que casi el 90% de los componentes fallan aleatoriamente y que programar overhauls eran contraproducentes para este tipo de componentes. Los investigadores llegaron a la conclusión que preservar las funciones críticas de los equipos era mucho mejor que aplicar un overhauls (Bloom, 2006, p. 10).

Un proceso efectivo de mantenimiento basado en confiabilidad permitirá que el plan de mantenimiento preventivo evolucione de simples recomendaciones de los proveedores, asignaciones arbitrarias o aleatorias, a basarse en fundamentos más prudentes como el análisis funcional y la identificación de cualquier consecuencia operacional o de seguridad a raíz de una falla funcional. Esto garantiza que el proceso de mantenimiento preventivo se concentre únicamente en esas tareas que son específicamente requeridas para tener un proceso seguro, confiable y eficiente quitando tareas innecesarias (Yssaad & Abene, 2015, pp. 350-360).

Sí es desarrollado apropiadamente el RCM, se lograría obtener un plan de mantenimiento proactivo basado en la criticidad, junto con un plan optimizado entre costos y beneficios enfocados en la preservación de los requisitos funcionales, selección de tareas basadas en la jerarquía de recursos y basadas en condición antes que basadas en tiempo. También junto con los análisis de características de fallas e información clave y priorizada sobre los activos

críticos. Por otro lado, se lograría minimizar los efectos sobre la salud, la seguridad y el medio ambiente, como también reducir los costos globales de mantenimiento y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de equipos.

La sociedad de ingenieros automotrices (SAE) para el año 1999 publica la norma SAE JA1011, “Evaluation Criteria for RCM Processes” donde se establecen los criterios evaluación para procesos RCM. Tres años más tarde SAE publica SAE JA1012, “A Guide to the RCM Standard”, donde se amplían y clarifican los conceptos claves y términos usados en la anterior SAE JA1011.

La sección 5 de la norma SAE JA1011 “Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)” se apoya en las respuestas a las 7 preguntas fundamentales (SAE:JA1011, 1999, p. 8). Además, se introduce el concepto de FMECA o modo de fallas, efectos y análisis de criticidad.

1. ¿Cuáles son las funciones y los modelos ideales de rendimiento del recurso en su actual contexto operativo (funciones)?
2. ¿En qué formas no puede cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
3. ¿Qué ocasiona cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla (efectos de la falla)?
5. ¿En qué forma es importante cada falla (consecuencias de la falla)?
6. ¿Qué debe hacerse para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de labores)?
7. ¿Qué debe hacerse si una tarea proactiva adecuada no puede ser encontrada (acciones por defecto)?

**1.1.5.1 Descripción de funciones de los equipos.** Teniendo en cuenta el contexto operacional del proceso RCM, hay que definir las funciones del equipo al cual se va a realizar RCM, éstas se dividen en 2 categorías.

**Funciones Primarias:** Es la razón de ser del activo o porque se compró el equipo. La función primaria del equipo contendrá claramente los estándares a los cuales será operado y mantenido. Las funciones además contienen temas como velocidad, producción, capacidad de carga y calidad del producto.

**Funciones secundarias:** Son las funciones que corresponden a las categorías de apariencia, control, seguridad, eficiencia, economía, higiene y confort.

Una función es todo aquello que el usuario espera que el activo o componente lleve a cabo dentro de sus estándares de diseño o desempeño. La selección de funciones puede hacerse mediante el siguiente flujograma de decisión:



Figura 11. Flujograma de decisión, Ams group. 2010. Adaptado de Conferencia de aplicación de RCM Asset management solutions.

1.1.5.2 **Fallas funcionales.** Se define “falla” como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga. Y una falla funcional se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario. Las fallas funcionales deben ser registradas en una tabla donde a cada función le sigue sus fallas funcionales (Zhang, Andrews, Reed, & Karlberg, 2017, pp. 1-3).

1.1.5.3 **Modos de falla.** Un modo de falla es cualquier evento físico que causa una falla funcional. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo adecuada. Como una máquina o sistema puede fallar por diversos motivos por esto es que se analizan los modos de falla. Lo anterior porque para una planta entera o industria los modos de falla pueden llegar a ser decenas de miles.

Estas fallas pueden ser de probabilidad incremental, de mortalidad infantil seguida de desgaste normal y solo de desgaste normal, como se muestra en la siguiente graficas de probabilidad versus tiempo.

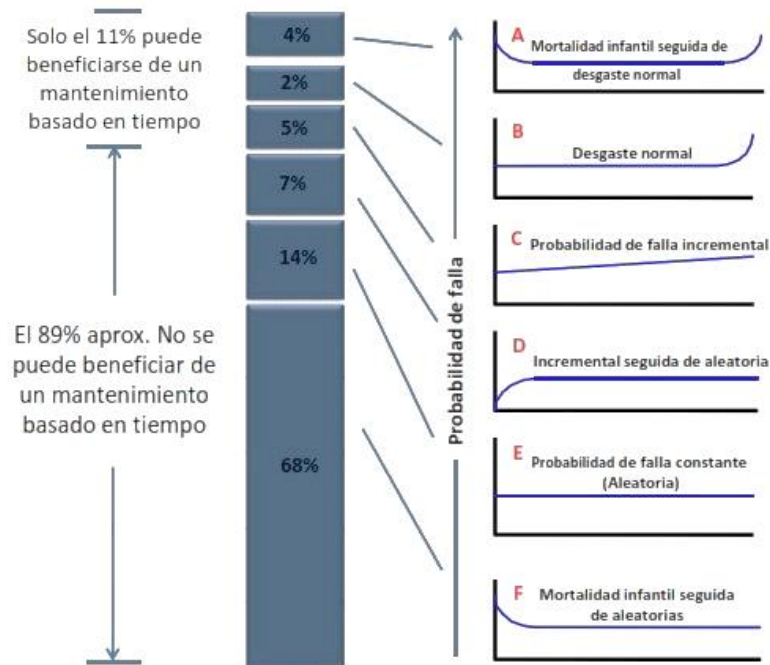


Figura 12. Probabilidades de falla vs. Tiempo, Smith & Hinchcliffe, 2004

Las fallas no asociadas con edad son la incremental seguida de aleatoria, la probabilidad de falla constante o aleatoria y la de mortalidad infantil seguida de aleatoria (Aguilar-otero, Torres-arcique, Magaña-jiménez, Mexicana, & Investigación, 2010, pp. 15-17 ) (Smith & Hinchcliffe, 2004, p. 54).

**1.1.5.4 Efectos de falla.** Los efectos de la falla describen que pasa cuando ocurre un modo de falla. La descripción de los efectos de falla debe hacer constar lo siguiente:

- La evidencia (si la hubiera) de que se ha producido una falla
- Las maneras (si las hubiera) en que la falla supone una amenaza para la seguridad del medio ambiente
- Las maneras (si las hubiera) en que afecta a la producción o a las operaciones.

- Los daños físicos (si los hubiera) causado por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.
- Los registros de antecedentes de fallas.
- El fabricante o proveedor del equipo.

**1.1.5.5 Consecuencias de la falla.** Las consecuencias son los impactos que produce cada modo de falla en la planta. Hay 4 categorías de consecuencias producidas y estas son:

- Consecuencia de fallas ocultas
- Consecuencias para la seguridad y el medio ambiente
- Consecuencias operacionales
- Consecuencias No-operacionales

Una falla oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales, si se produce por si sola. Por esto se incluyen dentro de los diseños elementos que presentan a las fallas ocultas. Estos elementos alertan a los operadores ante condiciones anormales, también detienen el equipo en caso de falla o eliminan y alivian las condiciones anormales que siguen luego de una falla para no causar daños más serios a los equipos. El objetivo de un programa de mantenimiento para esta función oculta es prevenir fallas múltiples y estas ocurren cuando el equipo protegido falla mientras el dispositivo de protección está en estado de falla.

Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que puedan lesionar a alguien o hasta tener fatalidades. Uno que tenga consecuencias ambientales causadas por pérdida de función que puedan conducir a una infracción de cualquier normativa o reglamento ambiental.

Las consecuencias operacionales son cuando la falla tiene efecto adverso directo sobre la capacidad operacional, como por ejemplo afectar la velocidad de bombeo de combustible, la calidad del producto entre otros casos, todas estas consecuencias incrementan los costos de operación y de la reparación. Debido a esto vale la pena realizar tareas proactivas para reducir los costos (Aguilar-otero et al., 2010, pp. 18-20).

**1.1.5.6 Análisis de criticidad.** El análisis de criticidad es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos económicos, humanos y técnicos. Para este ejercicio se tomarán en cuenta los siguientes criterios (Zio, 2007, p. 6):

- Seguridad
- Ambiente
- Forma de aparición
- Costos

En la siguiente tabla se muestran los criterios y sus ponderaciones para evaluar la criticidad de una instalación, sistema o equipo. La fórmula para calcular es esta criticidad es dada por:


$$\text{Criticidad total} = \text{frecuencia} * (\text{impacto a la seguridad} + \text{impacto al medio ambiente} + \text{forma de aparición} + \text{costos de mantenimiento})$$

Tabla 1

*Criterios de Criticidad*

<b>Frecuencia</b>	
Falla más de doce veces en un año	20
Falla entre ocho y doce veces en un año	15



Falla entre cuatro y siete veces en un año	10
Falla entre una y tres veces en un año	5
Falla menos de una vez al año	1
<b>Forma de aparición</b>	
Repentina Total	10
Progresiva Total	8
Repentina Parcial	6
Progresiva Parcial	4
<b>Impacto al Medio Ambiente</b>	
Contaminación grave no controlable, afecta los recursos sociales y el ecosistema. Es reversible en más de tres años o es irreversible.	15
Contaminación grave controlable, afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema. Es reversible en menos de tres años.	10
Contaminación no controlable con limpieza, afecta de manera leve al medio ambiente y reversible a corto plazo, no afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema.	5
Contaminación leve y controlable con limpieza o contención local. No daña el ecosistema.	2
No hay Contaminación.	0
<b>Impacto a la Seguridad</b>	
Fatalidad	15
Lesiones mayores que pueden generar incapacidad permanente o invalidez.	10
Lesiones con incapacidad mayor a 30 días.	5
Lesiones superficiales de poca gravedad no incapacitantes o incapacidad menor a 15 días.	2
No afecta / Ninguna Lesión	0
<b>Costos de Mantenimiento</b>	
Mayor a US 500.000	10
Entre US 250.000 y 500.000	6
Entre US 20.000 y 250.000	4
Entre US 1.000 y 20.000	2
Menor a US 1000	1
<b>Rango</b>	
< 50 No Critico	
50 -100 Semicrítico	
> 100 Critico	

*Nota:* Criterios de criticidad y sus valores de ponderación. Por H. Angulo, 2017

La metodología para determinar un análisis de criticidad de una unidad o equipo se utiliza una matriz de frecuencia por consecuencias de la falla. En un eje se representa la frecuencia de fallas y en otro los impactos o consecuencias en los cuales incurrirá la unidad o equipo en estudio si le ocurre una falla, como se observa en la siguiente figura.



Figura 13. Matriz de criticidad, Pemex, 2012. Guía de Análisis de criticidad, aprendizaje digital.

**1.1.5.7 Tareas proactivas e intervalos de labores.** Para predecir o prevenir cada falla hay que realizar tareas de reacondicionamiento y de sustitución cíclica para fallas relacionadas con la edad. Las características del desgaste ocurren mayormente cuando los equipos entran en contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad también tienden a estar asociadas con la fatiga, oxidación y corrosión (Montilla, Arroyave, & Silva, 2007, p. 275).

Las tareas de reacondicionamiento cíclico consisten en devolverle a un equipo la capacidad de cumplir su función, antes o en el límite de vida útil definida, independientemente de su condición en ese momento. Y las tareas de sustitución cíclica consisten en descartar un equipo o componente antes, o en el límite de edad definida,

independientemente de su condición en ese momento. La frecuencia de una tarea de reacondicionamiento o sustitución está determinada por la edad en la que el elemento o componente muestra un rápido incremento en probabilidad condicional de fallar (ver Figura 14).

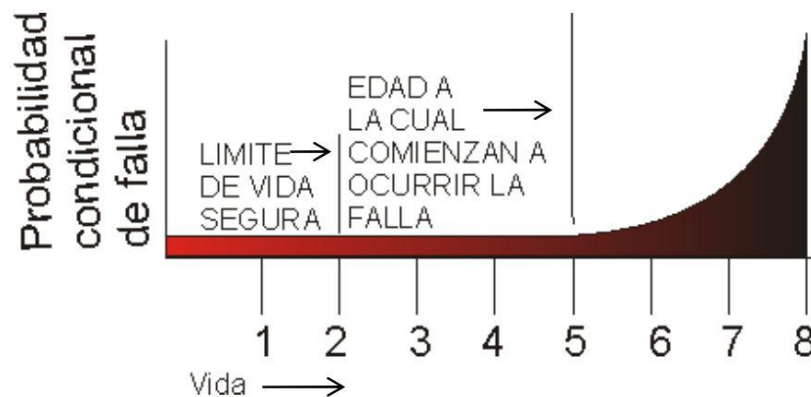


Figura 14. Probabilidad condicional de falla, Ams group, 2010. Adaptado de Conferencia de aplicación de RCM Asset management solutions.

Las tareas a condición consisten en chequear si hay fallas potenciales, para poder actuar para prevenir la falla funcional o evitar consecuencias de la falla funcional. Estas tareas a condición programadas son técnicamente factibles si es posible definir una condición clara de falla potencial, así como tener un intervalo P-F (anticipación de la falla) razonablemente consistente, y que sea suficientemente largo para ser de alguna utilidad y se pueda actuar. Para determinar el intervalo P-F se requiere una observación continua, investigación y comenzar con un intervalo corto y luego extenderlo gradualmente.

**1.1.5.8 Acciones por defecto.** Si una tarea proactiva no puede ser encontrada se tiene que tomar la decisión de rediseñar el sistema, siguiendo el siguiente diagrama de decisión en la Figura 15.

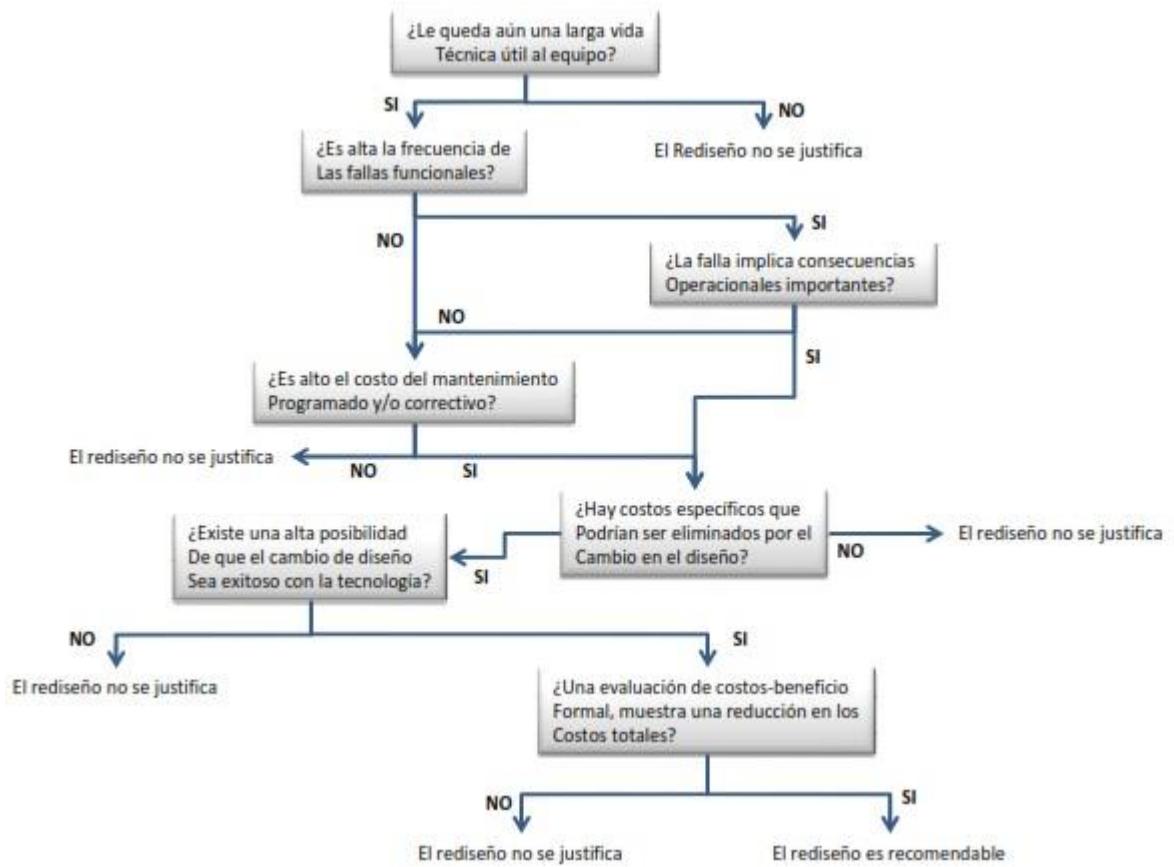


Figura 15. Acciones por defecto, Ams group, 2010. Adaptado de Conferencia de aplicación de RCM Asset management solutions.

## **Capítulo 2**

### **2.1 Generalidades de la empresa Carbones del Cerrejón Limited**

Cerrejón es un complejo de minería y transporte integrado en La Guajira, departamento ubicado en el extremo norte de Colombia. El complejo abarca una mina a cielo abierto de carbón térmico que produce más de 32 millones de toneladas al año, un ferrocarril de 150 km de largo y un puerto marítimo de cargue directo capaz de recibir buques de hasta 180.000 toneladas de capacidad. Emplea a 10.000 personas, de las cuales más del 99% son nacionales colombianos; es el exportador privado más grande de Colombia y uno de sus más importantes contribuyentes de impuestos.

Cerrejón es reconocido por sus programas sociales y ambientales, los cuales han merecido premios internacionales. El Sistema de Fundaciones Cerrejón, conformado por cuatro fundaciones, trabaja estrechamente con el Gobierno colombiano y con entes nacionales e internacionales para promover y acelerar el desarrollo sostenible y equitativo de La Guajira y de su gente (Cerrejón, 2017b).

Cerrejón es una empresa conjunta de gestión independiente, perteneciente en tres partes iguales a BHP Billiton, Anglo American y Glencore.

#### **Visión**

Ser un productor y exportador de carbón líder a nivel mundial y un aliado clave para el progreso y desarrollo sostenible de La Guajira.

#### **Misión**

Producir y exportar carbón de manera eficiente, confiable y rentable, cumpliendo con los más altos estándares en seguridad, salud, medio ambiente y ética empresarial, contribuyendo al progreso de nuestra gente, las comunidades vecinas y La Guajira (Cerrejón, 2017c).

## **2.2 Reseña histórica de la empresa**

En el año 1975 el gobierno colombiano invita a 17 firmas a participar en la licitación para la exploración, análisis geológicos y factibilidad de 32.000 hectáreas que actualmente componen el Cerrejón Zona Norte. Sólo cinco compañías se presentaron y únicamente tres cumplieron con los requisitos. Intercor, filial de Exxon, fue la escogida. Un año más tarde, Carbones de Colombia S.A. (Carbocol) e Intercor, después de un concurso internacional, firmaron en el mes de diciembre un contrato de asociación para explotar las reservas carboníferas de El Cerrejón Zona Norte. Para el año 1980 se obtienen los resultados de los estudios geológicos y de factibilidad y se firma la declaratoria de comercialidad de Cerrejón Zona Norte, para luego iniciar la construcción de instalaciones e infraestructura. Tres años más tarde, en 1983, otorgan en concesión a Carbocol unas zonas de playa y terrenos de bajamar en Bahía Portete y se autorizó la construcción y operación de un puerto privado para la explotación y exportación del carbón y todos aquellos productos necesarios de infraestructura de los proyectos carboníferos. Al mismo tiempo comienza la primera fase de Mushaisa, la unidad residencial de Cerrejón en La Mina, la cual entra en funcionamiento ofreciendo servicio para 500 personas. Para noviembre del mismo año, se le da el nombre de Puerto Bolívar al más importante puerto carbonífero de América Latina, que contaría con un canal dragado de 4 km de longitud, 19 m de profundidad y 225 m de ancho, con capacidad inicial para recibir barcos de hasta 180.000 toneladas de peso muerto.

Finalmente, después de seis años, en 1986, y con una inversión de 3.000 millones de dólares, se finalizó la etapa de construcción y montaje de las instalaciones e infraestructura de El Cerrejón Zona Norte, que dio inicio a la operación de minería a gran escala, para luego de un año iniciar el retrolleado del área norte del primer tajo, cumpliendo así con los programas

y compromisos adquiridos para la protección del medio ambiente. Para el año 2016 se ha alcanzado un acumulado aproximado de exportación de más de 600 millones de toneladas de carbón y hoy en día Cerrejón se ubica entre las 10 empresas más grandes del país (Cerrejón, 2017a).

### 2.3 Descripción de la empresa

Todo el complejo minero, compuesto por las instalaciones, infraestructura, talleres y área de minería, tiene una extensión de más de 30.000 hectáreas. A continuación, la ubicación de las áreas de la mina en la Figura 1.

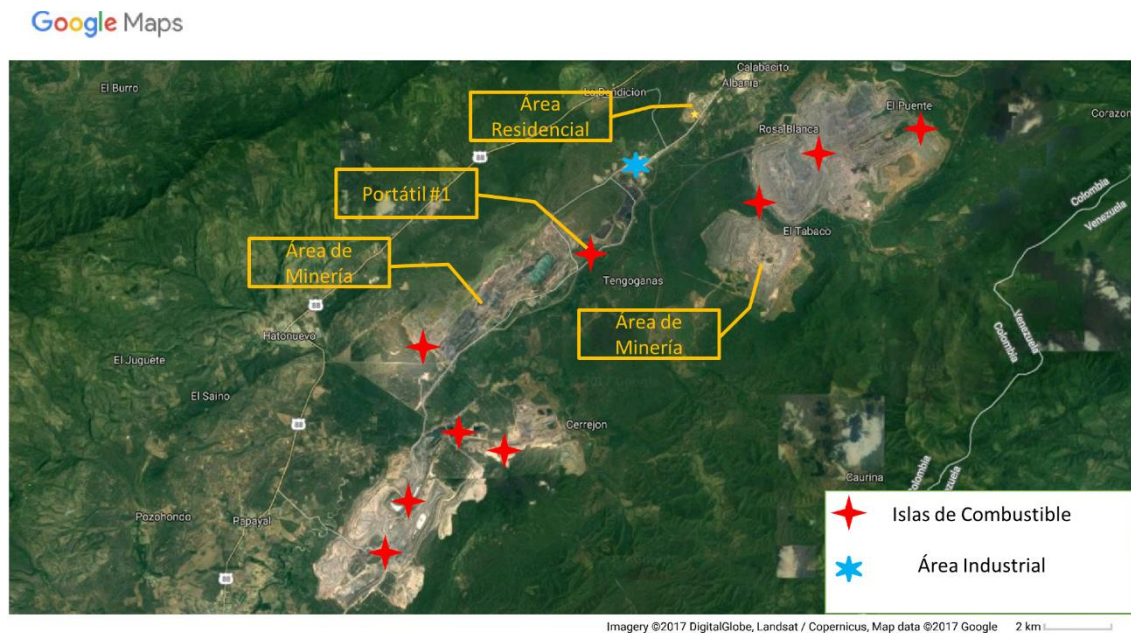


Figura 1. Área del complejo minero Cerrejón, DigitalGlobe & H. Angulo, 2017.

### 2.4 Islas de combustible portátiles

Dentro de las áreas de minería, se encuentran nueve islas de combustibles portátiles estratégicamente ubicadas. Estas islas proveen combustible, lubricantes y nitrógeno a los equipos mineros y auxiliares empleados en la explotación. Cada isla está compuesta por



cuatro sistemas: el sistema de lubricación, combustible, aire comprimido y eléctrico de alimentación, como se observa en las figuras 2 y 3.



Figura.2. Instalaciones de la isla de combustible, H. Angulo, 2016

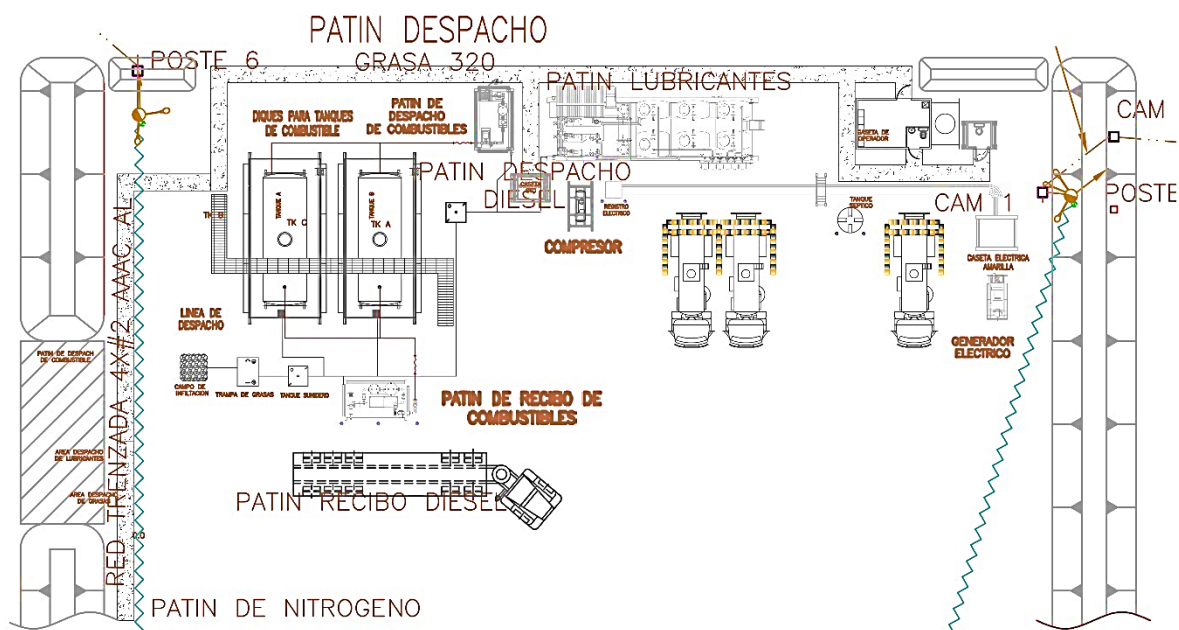


Figura 3. Vista en planta isla de combustible, Cerrejón, 2012. Adaptado de Plano 75669A-D7210 Carbones del Cerrejón Limited.



### 2.4.1 Sistema de lubricación.

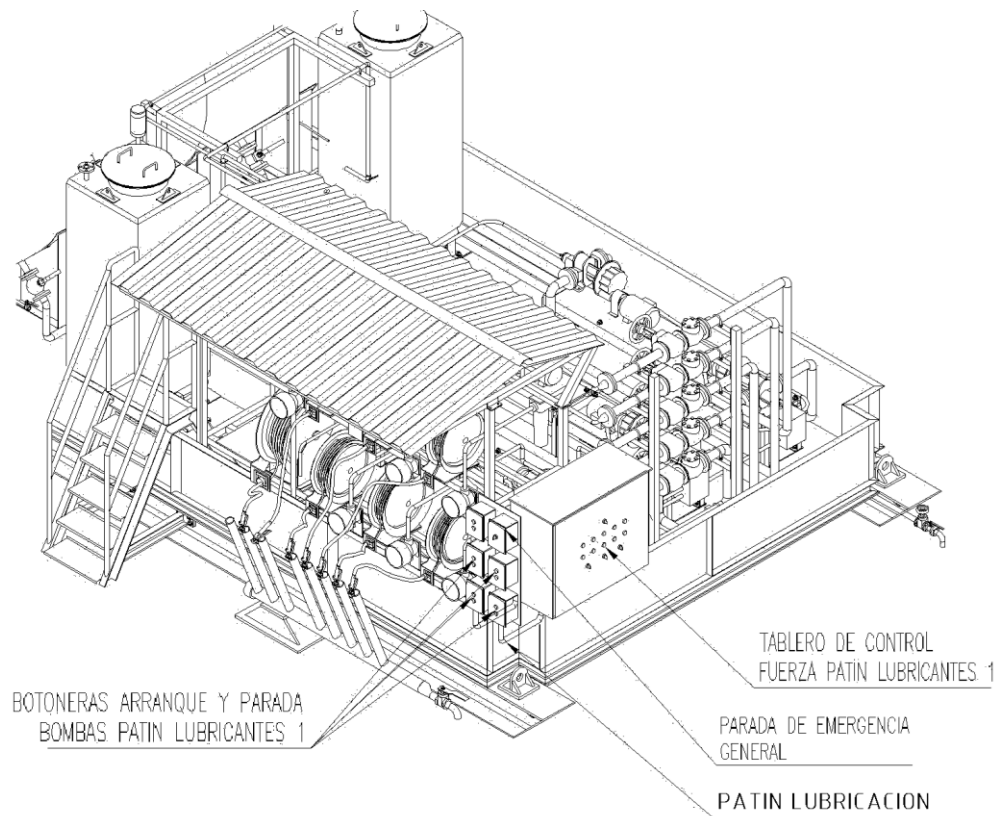
El sistema de lubricación tiene como función proveer lubricantes para motor y transmisión, grasas para partes móviles y refrigerante para los motores de los equipos mineros y auxiliares. Este sistema está compuesto por equipos de bombeo, de recibo y de despacho, los cuales se encargan de bombear hacia y desde los tanques de almacenamiento, los distintos tipos de lubricantes según sea el caso. Cada bomba de despacho tiene pulsadores de control de arranque, parada y parada de emergencia. Las bombas son accionadas por un motoreductor acoplado. El sistema está compuesto por un tablero de control, tuberías, válvulas, medidores, mangueras y pistola de despacho. En las figuras 4 y 5 se pueden observar estos componentes, en la tabla 2 se muestran los tipos de lubricantes manejados en las islas.

Tabla 2

#### *Tipos de Lubricantes*

	<b>FLUIDO</b>
<b>1</b>	ACEITE TAC-4-SAE 10W
<b>2</b>	ACEITE TAC-4-SAE 30W
<b>3</b>	ACEITE TOPTURBO-SAE 15W40
<b>4</b>	ACEITE TAC-4-SAE 50W
<b>5</b>	ACEITE TURBO-SAE 30W
<b>6</b>	GRASA LITH SM
<b>7</b>	GRASA CALIBER 460M
<b>8</b>	REFRIGERANTE RADIOX LPLUS

*Nota.* Tipo de aceites, grasa y refrigerante. Por H. Angulo, 2017



*Figura 4.* Vista isométrica de patín de lubricación, Cerrejón, 2012. Adaptado de Plano 75669A-D7210 Carbones del Cerrejón Limited.



*Figura 5.* Patín de lubricación, H. Angulo, 2016

### 2.4.2 Sistema de combustible.

El sistema de combustible tiene como función proveer diésel a los equipos mineros y auxiliares. Este está compuesto por dos patines, uno de recibo del combustible desde el carro cisterna hacia los tanques de almacenamiento (Ver Figura 7) y otro de despacho encargado de bombear desde los tanques de almacenamiento hacia el equipo que recibe el servicio. Cada patín tiene sus pulsadores de control de arranque, parada y parada de emergencia. La bomba es accionada por un motor acoplado a ella como se observa en la Figura 6. El sistema también tiene un tablero de control, las tuberías, válvulas, presostato, filtros, medidores, mangueras y pistola.



Figura 6. Conjunto motor-bomba despacho combustible, H. Angulo, 2016.



Figura 7. Patín recibo combustible, H. Angulo, 2016.

### 2.4.3 Sistema de aire comprimido.

Este sistema tiene como función proveer aire comprimido para el accionamiento de las bombas neumáticas de recibo de aceites del sistema de lubricación, y para la bomba neumática de despacho de refrigerante. (Ver Figura 8 y 9). El sistema está compuesto por el compresor, su sistema de control, las tuberías, presostato y válvulas.



*Figura 8.* Compresor, H. Angulo, 2016.



*Figura 9.* Bomba Neumática, H. Angulo, 2016.

#### **2.4.4 Sistema eléctrico de alimentación.**

El sistema eléctrico de alimentación tiene la función de proveer el fluido eléctrico para todos los equipos de la isla de combustible. Está compuesto por el tablero principal de alimentación, el tablero de la transferencia (Ver Figura 10), los tableros de control de los equipos, el motogenerador de emergencia (Ver Figura 11) y el transformador de baja tensión.



*Figura 10.* Transferencia automática, H. Angulo, 2016.



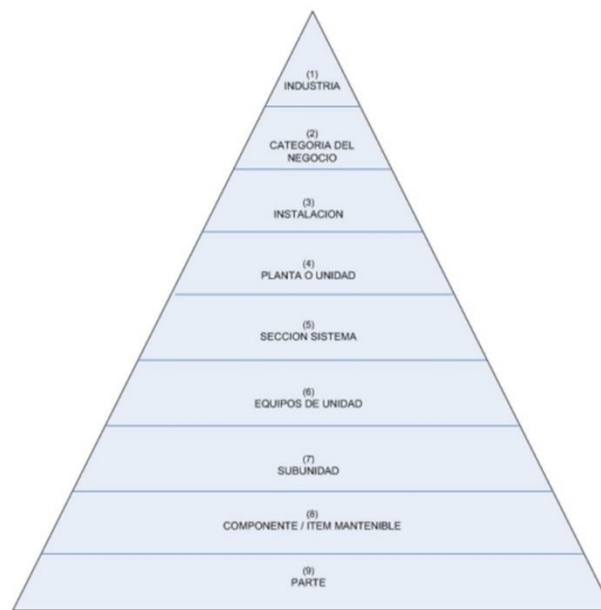
*Figura 11.* Motogenerador, H. Angulo, 2016.

#### **2.5 Estructura funcional de equipos**

La estructura funcional de los equipos es una división jerárquica lógica de un activo en escalas progresivas en sistemas, subsistemas, componentes, etc. También llamado jerarquía de



equipos o árbol de equipos, la estructura funcional debe incluir la identificación de los sistemas, es decir, que debe ser exclusivo para cada sistema, unidad o equipo y la relación entre estos elementos debe darse como padre e hijo. Para este caso se pueden usar identificaciones existentes como los Tags o números de equipos. En la figura siguiente se muestra gráficamente el modelo de la estructura funcional de los equipos según la norma ISO 14224 (ISO, 2016).



*Figura 12.* Estructura funcional, ISO-14224, 2016. Adaptado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14224:ed-3:v2:en>

### Capítulo 3

En el siguiente capítulo se explica el proceso productivo específico de la isla de combustible portátil #1, plan de mantenimiento aplicado actualmente y pasos para la implementación de mantenimiento basado en confiabilidad, junto con un análisis de criticidad.

#### 3.1 Isla de combustible portátil # 1

La isla portátil de combustible # 1 está ubicada en el costado izquierdo de la vía del carbón sentido Sur Norte en el Expanded West Pit en área de mina (ver figura 2.1). En la isla se tienen los servicios de suministro de combustible, lubricantes, y nitrógeno para las llantas de los equipos mineros.

La isla de combustible está compuesta por varios sistemas y equipos encargados de dar el servicio y suministro para los equipos mineros. Dichos sistemas están separados en su respectivo patín, al ser esta isla totalmente portátil. Los equipos que componen cada sistema son comúnmente bombas centrífugas de desplazamiento positivo y de diafragma encargadas de impulsar el combustible o lubricante hacia el equipo recibiendo el servicio. Otros equipos auxiliares o de respaldo son el motogenerador y el compresor. En la tabla 1 se muestran los 18 equipos presentes en la isla. La isla tiene un total de 18 equipos y estos de 8 distintos tipos.

Tabla 1

#### *Listado de Equipos*

<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>
<b>1</b>	Bomba Centrífuga HIDROMAC®
<b>1</b>	Bomba Desplazamiento Positivo BLACMER®
<b>5</b>	Bomba Desplazamiento Positivo ROPER®
<b>6</b>	Bomba Neumática WILDEN®
<b>2</b>	Bomba Neumática LINCOLN®

1	Compresor INGERSOLL RAND®
1	Motogenerador STEWART & STEVENSON®
1	Transformador Seco Auxiliar SUNTEC®

*Nota:* Listado de equipos de la isla de combustible portátil #1. Por H. Angulo, 2017

### 3.2 Descripción del proceso

El proceso lo componen cuatro sistemas independientes siguientes: el sistema de combustible, lubricación, aire comprimido y eléctrico de alimentación.

El proceso en el sistema de combustible tiene dos fases, el recibo y el despacho. En la fase de recibo, el combustible se recepciona por medio de un camión cisterna y el patín de recibo de combustible compuesto por una bomba centrífuga HIDROMAC® impulsada por un motor WEG® de 15HP, un par de filtros y un medidor LIQUID CONTROLS®. El combustible es almacenado en dos tanques uno de 10.000 galones y 12.000 galones respectivamente.

En la segunda fase o fase de despacho, el proceso de entrega de combustible se realiza con el patín de despacho, el cual lo compone una bomba de desplazamiento positivo BLACKMER® accionada por un motor US MOTORS® de 10HP, un par de filtros, un medidor LIQUID CONTROLS® y la manguera y pistola despachadora de Diésel.

El segundo sistema, que es el de lubricación, también tiene 2 fases de recibo y de despacho. Los lubricantes son recibidos en el patín de lubricantes integrado por cinco bombas neumáticas WILDEN® encargadas de impulsar cada tipo de aceite. Las grasas y refrigerante son recibidos directamente desde los camiones cisterna. Todos los lubricantes son almacenados en unos tanques de 500 galones cada uno. La segunda fase, que es el proceso de despacho de lubricantes, se realiza en el mismo patín, pero en este caso se utilizan cinco



bombas de desplazamiento positivo ROPER® accionadas por motor-reductor NORD® de 2HP cada una, además se emplean filtros, un medidor LINCOLN®, las mangueras y finalmente la pistola despachadora de lubricante. Las grasas se despachan con dos bombas neumáticas LINCOLN® luego un medidor LINCOLN®, las mangueras y pistola despachadora de grasa. El refrigerante es despachado con una bomba neumática WILDEN®, un medidor LINCOLN®, las mangueras y finalmente la pistola despachadora de refrigerante.

El sistema de Aire comprimido compuesto por un compresor INGERSOLL RAND®, es el encargado de proveer el aire para el accionamiento de las distintas bombas neumáticas utilizadas en el patín de lubricación.

El cuarto sistema, que es el eléctrico de alimentación, lo componen los tableros eléctricos principal, de transferencia y de control de bombas. También un motogenerador de respaldo STEWART & STEVENSON® el cual es un equipo vital para la operación de la isla, para que el servicio no se suspenda debido a los cortes de energía ocasionados por accionamientos o fallas en las redes de alta tensión de la mina. Este generador tiene la capacidad de suplir la totalidad de la carga de la isla con 100 kVA de potencia y un nivel de tensión de 480V. El otro componente es el transformador seco auxiliar SUNTEC®, de 45kVA de potencia y niveles de tensión de 480V/225V utilizado para el alumbrado exterior y los servicios auxiliares de la isla. El diagrama del proceso de los sistemas de la isla se ilustra a continuación. (Ver Figura 1).

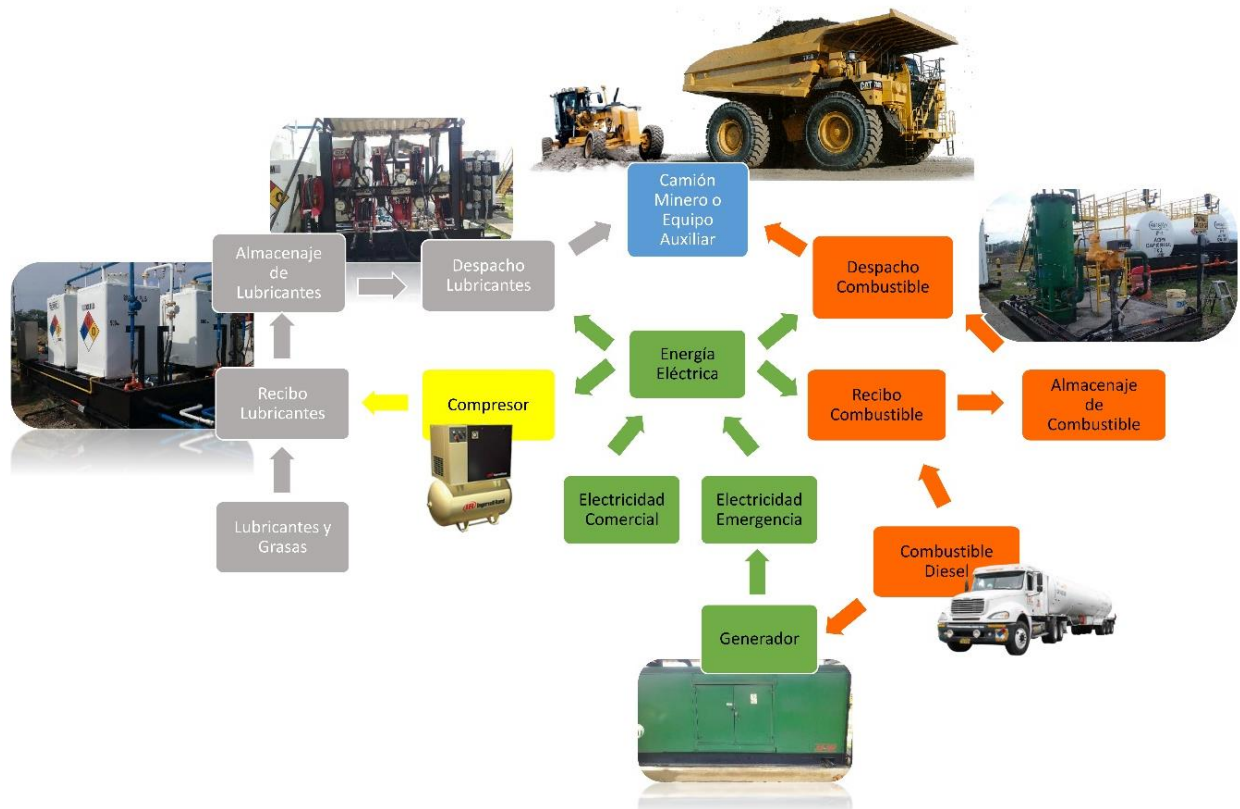


Figura 1. Flujograma del proceso, por H. Angulo, 2017

### 3.3 Árbol jerárquico de equipos

Aplicando el modelo ISO 14224, la isla de combustible portátil #1 se considera como la instalación y cada unidad estaría compuesto por los sistemas de lubricación, combustible, aire comprimido y eléctrico de alimentación con sus respectivos equipos, componentes y partes.

A continuación, en la tabla 2, se observa el árbol jerárquico y el listado de equipos de la isla.

Tabla 2

*Arbol Jerárquico*

Instalación	Unidad	Equipos de unidad	Ítem mantenible
<b>Islas de combustible portátil 1</b>	Sistema de lubricación	Bomba despacho aceite 1 TAC-4-SAE 10w Tags: PU-321	Control eléctrico Motor eléctrico 2HP Nord 480v Bomba Roper 26 am Reductor Acople
		Bomba despacho aceite 2 TAC-4-SAE 30w Tags: PU-321e	Control eléctrico Motor eléctrico 2HP Nord 480v Bomba Roper 26 am Reductor Acople
		Bomba despacho aceite 3 Topturbo-SAE 15w40 Tags: PU-325b	Control eléctrico Motor eléctrico 2HP Nord 480v Bomba Roper 26 am Reductor Acople
		Bomba despacho aceite 4 TAC-4-SAE 50w Tags: PU-321d	Control eléctrico Motor eléctrico 2HP Nord 480v Bomba Roper 26 am Reductor Acople
		Bomba despacho aceite 5 turbo-SAE 30w Tags: PU-325b	Control eléctrico Motor eléctrico 2HP Nord 480v Bomba Roper 26 am Reductor Acople Bomba Lincoln

	Bomba despacho grasa 1 Lith sm Tags: PU-321g Bomba despacho grasa 2 Caliber 460m Tags: PU-321f	Bomba Lincoln
	Bomba despacho refrigerante 1 Radiox lplus	Bomba Wilden 04-5080-01
	Bomba recibo aceite 1 TAC-4-SAE 10w Tags: PU-320a	Bomba Wilden 04-5080-01
	Bomba recibo aceite 2 TAC-4-SAE 30w Tags: PU-320c	Bomba Wilden 04-5080-01
	Bomba recibo aceite 3 Topturbo-SAE 15w40 Tags: PU-324f	Bomba Wilden 04-5080-01
	Bomba recibo aceite 4 TAC-4-SAE 50w Tags: PU-320d	Bomba Wilden 04-5080-01
	Bomba recibo aceite 5 md-SAE 30w Tags: PU-324e	Bomba Wilden 04-5080-01
Sistema de combustible	Bomba de recibo Tags: PU-318	Control eléctrico Motor eléctrico 15HP WEG 480v Presostato Bomba hidromac Acople  Control eléctrico

	Bomba de despacho Tags: PU-319	Motor eléctrico 10HP US motors 480v Bomba Blackmer Acople Reductor
Sistema de aire comprimido IngersollRand No. 4100031 Tags: CO-304	Sistema eléctrico	Motor eléctrico Control Presostato Compresor Filtros Válvula reguladora
Sistema eléctrico alimentación	Sistema mecánico	Transformador seco 45kva 480/127v Tags: TRA-227
	Red eléctrica	Tablero de distribución Tags: DP-551
		Transferencia Tags: ES-301
	Motogenerador S&Stevenson 100kva No. 6000181 Tag: GS-181	Motor diésel Ventilador Filtros Radiador Mangueras Correas Gobernador Turbo Filtro de aceite Filtro de aire Exosto Generador Cargador de batería Batería Excitatriz Control electrónico

Nota. Árbol jerárquico funcional de equipos de la isla de combustible portátil # 1. Por H. Angulo, 2017

### **3.4 Caracterización del sistema de mantenimiento actual**

Actualmente en la isla de combustible #1 se aplica un plan de mantenimiento preventivo cada 28 días llamado “seis” denominado por la empresa, proveniente de la metodología de mejora de procesos “six sigma”. Este se divide en tres órdenes de servicio, donde se aplican los procedimientos dispuestos para el motogenerador, el compresor, los sistemas de bombeo de combustibles y lubricantes, y sistemas eléctricos. En estos procedimientos se hace una inspección y limpieza del área donde se encuentra el equipo, además se revisa la lubricación, posibles fugas, partes móviles, sellos, tornillería y las condiciones de operación de los equipos.

Al motogenerador y al compresor se le dedican cuatro horas hombre con dos técnicos, a los sistemas de bombeos y sistemas eléctricos se le invierten 11 horas hombre con dos técnicos. El total de horas invertidas en el “seis” son: 4 horas al motogenerador más 4 horas al compresor más las 11 horas a los demás sistemas da un total de 19 horas hombre. Es decir que para ese día de turno de 11.5 horas cada técnico atiende los procedimientos de mantenimiento en 9.5 horas. El costo de la hora hombre tiene un valor de \$22.5 dólares, multiplicado por las 19 horas hombre da un costo total de \$427.5 dólares por el “seis” de mantenimiento de la isla.

En total solamente en mantenimiento preventivo-predictivo se invierten \$5,557.5 dólares por año en la isla de combustible portátil #1 en mano de obra, sin incluir los demás insumos, repuestos, o mantenimientos correctivos efectuados.

### **3.5 Preparación para implementación de RCM**

Para iniciar la preparación para la implementación de RCM dentro de las instalaciones del complejo minero del Cerrejón y más específicamente en las islas de combustibles, se deben aplicar los siguientes pasos.

- Seleccionar el grupo RCM y sus responsabilidades.
- Identificar los elementos que serán objeto de análisis.
- Priorizar los objetos de análisis.
- Identificar y documentar los análisis y el proceso de aprobación.
- Orientación del proyecto o entrenamiento.
- Desarrollo de reglas de análisis y supuestos.

Paso 1: Seleccionar el grupo RCM y sus responsabilidades.

Para este paso se requiere realizar la composición del grupo en general con los operadores, técnicos mecánicos y electricistas, ingenieros, administradores de datos o analistas, logística, coordinadores y el director del proyecto RCM. A cada uno de los participantes se les darán responsabilidades específicas como soportar roles, realizar tareas, recolectar datos, documentar y analizar, revisar, aprobar e implementar.

Paso 2: Identificar los elementos que serán objeto del análisis.

Para este caso específico de la isla de combustible portátil #1, los elementos que serán objeto del análisis serán los 18 equipos en la Tabla 1. Estos equipos serán caracterizados y estructurados según la criticidad luego del análisis.

Paso 3: Priorizar los objetos de análisis.

Luego de los análisis de criticidad y caracterizaciones de falla en los equipos se da lugar al listado de prioridad de cada uno.

Paso 4: Identificar y documentar los análisis y el proceso de aprobación.

Todos los análisis, caracterizaciones y jerarquizaciones deben ser documentados para su aprobación y para posterior planeación y ejecución de tareas.

Paso 5: Orientación del proyecto o entrenamiento.

En este paso el objetivo es empoderarse del proceso y deshacerse de potenciales obstáculos, donde se incluirá todo el personal significativo y afectado por los resultados de los análisis, incluyendo técnicos, operadores y mandos medios. En estas orientaciones se deben expresar todos elementos identificados en los cuatro pasos anteriores, como también hacer revisión del proceso de RCM y temas como qué se espera de cada individuo frente al proceso y qué es pertinente para ellos.

Paso 6: Desarrollo de reglas de análisis y supuestos.

Este último paso de la planeación y preparación es donde se recolecta la información para llevar acabo el análisis RCM. En este se deben incluir las descripciones del contexto operacional de las islas y casa sistema, los procedimientos de operación estándar, las fuentes de datos, bases de datos de los modos de falla, matrices de riesgo y criticidad, tiempos de labor del mantenimiento, probabilidades de fallas, métodos analíticos y métodos de análisis de costo - efectividad.

Todos los pasos anteriores deben documentarse como parte del proyecto de análisis de RCM, y cumplir con los alcances, asegurar consistencia en el proceso de análisis y establecer las prioridades y programación.

**3.5.1 Análisis de criticidad.**

Como modelo de ejemplo para este proyecto se estableció el método de evaluación explicado en el epígrafe 1.1.5.6 para jerarquizar los equipos y elementos a evaluar. Teniendo en cuenta lo anterior, a cada equipo de la isla se le asignó una criticidad tomando como principio una falla total del mismo. Es decir, tomando un límite extremo, dando como resultado el siguiente listado:



Tabla 3

Análisis de Criticidad.

Tags	Equipo	Fluido	Marca	Criticidad					
				FR	IS	IM A	FA	CM	Total
<b>PU-321</b>	Bomba despacho aceite 1	Tac-4-SAE 10w	Roper/Nord	5	0	2	4	2	40
<b>PU-321E</b>	Bomba despacho aceite 2	Tac-4- SAE 30w	Roper/Nord	5	0	2	4	2	40
<b>PU-325B</b>	Bomba despacho aceite 3	Topturbo- SAE 15w40	Roper/Nord	5	0	2	4	2	40
<b>PU-321D</b>	Bomba despacho aceite 4	Tac-4- SAE 50w	Roper/Nord	5	0	2	4	2	40
<b>PU-325B</b>	Bomba despacho aceite 5	Turbo- SAE 30w	Roper/Nord	5	0	2	4	2	40
<b>PU-321G</b>	Bomba despacho grasa 1	Lith sm	Lincoln	5	0	2	4	2	40
<b>PU-321F</b>	Bomba despacho grasa 2	Caliber 460m	Lincoln	5	0	2	4	2	40
<b>PU-320R</b>	Bomba despacho refrigerante	Radiox lplus	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-320A</b>	Bomba recibo aceite 1	Tac-4- SAE 10w	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-320C</b>	Bomba recibo aceite 2	Tac-4- SAE 30w	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-324F</b>	Bomba recibo aceite 3	Topturbo-sae 15w40	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-320D</b>	Bomba recibo aceite 4	Tac-4- SAE 50w	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-324E</b>	Bomba recibo aceite 5	Md- SAE 30w	Wilden	5	0	2	4	2	40
<b>PU-318</b>	Bomba de recibo	Diésel	Hidromac/Weg	10	2	2	10	4	180
<b>PU-319</b>	Bomba de despacho	Diésel	Blackmer/US motor	10	2	2	10	4	180
<b>CO-304</b>	Sistema de aire comprimido	Aire	Ingersoll R and	5	2	2	8	6	90
<b>GS-181</b>	Motogenerador 100kva	Eléctrico	Stewart & Stevenson	10	2	2	8	6	180

<b>TRA-227</b>	Transformador seco 45kva	Eléctrico	Suntec	5	0	0	6	4	50
----------------	-----------------------------	-----------	--------	---	---	---	---	---	----

*Nota.* Resultados de análisis de criticidad. FR: frecuencia, IS: impacto a la seguridad, IMA: impacto al medio ambiente, FA: forma de aparición, CM: costo de mantenimiento. Por H. Angulo, 2017.

Los equipos más críticos de este caso son, la Bomba de despacho de Combustible Diésel seguida por la bomba de recibo de combustible Diésel y el motogenerador de emergencia de 100kVA. Son semicríticos el transformador seco de 45kVA y el sistema de Aire comprimido.

Para lograr un análisis de criticidad se requiere tener con certeza la información de los fallos presentados por cada equipo, asociando estos criterios con cada modo de falla para lograr un mejor análisis y así jerarquizar los equipos para optimizar efectivamente el proceso. Con la siguiente tabla se recopilará la información faltante para analizarlos y dar con los valores de ponderación para evaluar la criticidad de cada modo de falla por equipo, teniendo en cuenta los cuatro criterios mencionados. Esta tabla se diligencia teniendo en cuenta el análisis funcional, modos y efectos de las fallas presentados en el epígrafe siguiente.

Tabla 4

## Hoja de Datos

[illegible]

*Nota.* Hoja de datos para recopilar información de modos de falla presentados en equipos. Por H. Angulo, 2017

### 3.5.2 Análisis funcional, modos y efectos de fallas.

A continuación, se presenta la tabla de las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos de las fallas de los equipos más críticos de la Isla Portátil 1.

Tabla 5

*Funciones, fallas funcionales, modos y efectos de falla*

	<b>Función (F)</b>	<b>Fallas funcionales (FF)</b>	<b>Modo de falla (FM)</b>	<b>Efecto de la falla funcional</b>
<b>Bomba despacho de combustible diésel</b>	1 Proveer combustible a los equipos mineros y auxiliares a una razón de 200 gpm	A Incapaz de bombear el combustible	1 Tubería de combustible tapada o rota	No llega combustible a equipo minero
			2 Motor no arranca	No llega combustible a equipo minero
			3 El reductor se queda sin aceite	No llega combustible a equipo minero
			4 Gripaje de grupo motor	No llega combustible a equipo minero
			5 Bobinado roto o quemado	No llega combustible a equipo minero
			6 Rodamientos en mal estado	No llega combustible a equipo minero
		B Flujo de combustible restringido	1 Desgaste de los impulsores	Llega poco combustible al equipo minero
			2 Elevada diferencia de presión	Llega poco combustible al equipo minero por filtros obstruidos
		C Bomba genera presión pero no bombea combustible	1 La línea de succión esta taponada	No llega combustible a equipo minero
			2 Válvulas cheques dañadas o mal cerradas	No llega combustible a equipo minero
			3 Filtros tapados	No llega combustible a equipo minero
		D Bomba consume mucha potencia	1 Hay des alineamiento entre eje bomba y eje motor	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
			2 Hay rozamiento entre partes que giran y partes estacionarias	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
			3 Rodamientos malos o gastados	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía

			4	Rodamientos mal lubricados.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			5	Mucho lubricante en los rodamientos.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			6	Sello mecánico mal instalado (muy apretado).	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			7	Empaquetadura muy apretada o mal seleccionada.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			8	Eje torcido.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
E Protección térmica se dispara			1	Desequilibrios entre las fases	No hay bombeo	
			2	Térmico mal calibrado	No hay bombeo	
			3	Bobinado roto o quemado	No hay bombeo	
			4	Rodamientos en mal estado	No hay bombeo	
			5	El motor se calienta porque el ventilador se ha roto	No hay bombeo	
F Protección magnética se dispara			1	Elemento de protección en mas estado	No hay bombeo	
			2	Terminal defectuoso	No hay bombeo	
			3	Bobinado roto o quemado	No hay bombeo	
G Alta temperatura en carcasa externa			1	Suciedad excesiva en la carcasa	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			2	Ventilador roto	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			3	Rodamientos en mal estado	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
			4	Rodamientos mal lubricados.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
Bomba recibo de combustible diésel	2	Bombear combustible e desde el camión cisterna hacia los tanques de almacenamiento de la isla a una razón de 200 gpm	A Incapaz de bombear el combustible	1	Tubería de combustible tapada o rota	No llega combustible a tanque de almacenamiento
				2	Motor no arranca	No llega combustible a tanque de almacenamiento
				3	Gripaje de grupo motor	No llega combustible a equipo minero
				4	Bobinado roto o quemado	No llega combustible a equipo minero
				5	Rodamientos en mal estado	No llega combustible a equipo minero
			B	1	Desgaste de los impulsores	Llega poco combustible al tanque

	Flujo de combustible restringido	2	Válvula de eliminación de aire con fuga	La bomba toma aire
C	Bomba genera presión pero no bombea combustible	1	La línea de succión esta taponada	No llega combustible a equipo minero
		2	Válvulas cheques dañadas o mal cerradas	No llega combustible a equipo minero
		3	Filtros tapados	No llega combustible a equipo minero
D	Bomba consume mucha potencia	1	Hay des alineamiento entre eje bomba y eje motor	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		2	Hay rozamiento entre partes que giran y partes estacionarias	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		3	Rodamientos malos o gastados	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		4	Rodamientos mal lubricados.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		5	Mucho lubricante en los rodamientos.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		6	Sello mecánico mal instalado (muy apretado).	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		7	Empaquetadura muy apretada o mal seleccionada.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		8	Eje torcido.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
E	Protección térmica se dispara	1	Desequilibrios entre las fases	No hay bombeo
		2	Térmico mal calibrado	No hay bombeo
		3	Bobinado roto o quemado	No hay bombeo
		4	Rodamientos en mal estado	No hay bombeo
		5	El motor se calienta porque el ventilador se ha roto	No hay bombeo
F	Protección magnética se dispara	1	Elemento de protección en mas estado	No hay bombeo
		2	Terminal defectuoso	No hay bombeo
		3	Bobinado roto o quemado	No hay bombeo
G	Alta temperatura en carcasa externa	1	Suciedad excesiva en la carcasa	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía
		2	Ventilador roto	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía

				3	Rodamientos en mal estado	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
				4	Rodamientos mal lubricados.	Sobre calentamiento y mucho consumo de energía	
Motogenerador 100kva S&Steve nson	3	Proveer fluido eléctrico de emergencia para los equipos de los sistemas de la isla de combustibl e a un nivel de tensión de 480/277v	A	No está preparado para suplir una emergencia	1	El alternador no carga	No arranca el motor de grupo
					2	El interruptor de presión de aceite de la bomba de lubricación se encuentra pegado	El motor se quedaría sin lubricación
					3	La bomba de aceite no se mueve	El motor no tiene lubricación
					4	Agua en el cilindro	No arranca el motor de grupo
					5	El pistón golpea las válvulas	No arranca el motor de grupo
					6	El pistón cabecea	No arranca el motor de grupo
			B	No mantiene la generación a las condiciones deseadas	1	Las conexiones y los interruptores de encuentran oxidados	Las conexiones generan calentamiento
					2	Baja velocidad del giro de arranque	No arranca el motor de grupo
					3	Falta de potencia	No arranca el generador
					4	Fuga en la admisión del aire	No se estabiliza el motor
					5	El turbo compresor no funciona	La generación se realiza a una frecuencia incorrecta , el voltaje es muy bajo
					6	La presión de combustible es variable	La generación se realiza a una frecuencia incorrecta , el voltaje es muy bajo
					7	La velocidad en rpm es muy baja	La generación se realiza a una frecuencia incorrecta , el voltaje es muy bajo
					8	Cambios repentinos de velocidad	La generación se realiza a una frecuencia incorrecta , el voltaje es muy bajo
					9	La variación de tensión es superior a 1 minuto	El generador genera un fluido eléctrico no conforme
					10	Desbalance de tensión	El generador genera un fluido eléctrico no conforme
					11	Generación con armónicos de tensión	El generador genera un fluido eléctrico no conforme
					12	Muecas de tensión (notches)	El generador genera un fluido eléctrico no conforme
					13	Variaciones de frecuencia	El generador genera un fluido eléctrico no conforme
					14	El motor arranca y para repentinamente	La generación se interrumpe
					15	Ruido en el tren de válvulas	El motor genera mucho ruido
					16	Golpeteo en el tren de válvulas	El motor genera mucho ruido

		17	Ruido en el motor	El motor genera mucho ruido
		18	El amortiguador de vibración y polea se han aflojado	El motor genera mucho ruido
		19	Guías de válvulas gastadas	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		20	Anillos de pistón rotos o desgastados	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		21	Fuga por el sello de aceite de turbo-compresor	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		22	Aceite en el escape	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		23	Inyectores en malas condiciones	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		24	Refrigerante en el aceite	El motor genera muchos gases tóxicos durante la combustión
		25	Refrigerante demasiado caliente	El motor se recalienta
		26	La temperatura en el escape es demasiado alta	El motor se recalienta
C	No se realiza generación eléctrica	1	Batería tiene poca carga	No arranca el motor de grupo
		2	El solenoide del motor de arranque no se mueve	No arranca el motor de grupo
		3	El motor de arranque no se mueve	No arranca el motor de grupo
		4	El motor se encuentra atorado en el cigüeñal	No arranca el motor de grupo
		5	Tubería de combustible sucia o rota	No arranca el motor de grupo
		6	La presión de combustible es muy baja	No arranca el motor de grupo
		7	No llega combustible los cilindros	No arranca el motor de grupo
		8	Pistón atascado, cojinetes atascados	No arranca el motor de grupo

*Nota.* Análisis funcional, fallas funcionales, modos de falla y efectos de la falla. Por H. Angulo, 2017

### 3.5.3 Tareas proactivas e intervalos de labores y acciones por defecto.

Después de contar con todos los datos, se continúa con la aplicación del diagrama de decisión RCM 2 que se muestra a continuación, para llegar a la selección de las tareas o el rediseño. Este diagrama de decisión se lleva a la hoja de decisión (ver tabla 8) para así



programar las tareas al finalizar, se seleccionan unos estándares de trabajo que irían directamente al sistema de gestión de activos, para que, al programarse las tareas, cada equipo tenga sus procedimientos y tareas específicas dentro de la orden emitida por el sistema.

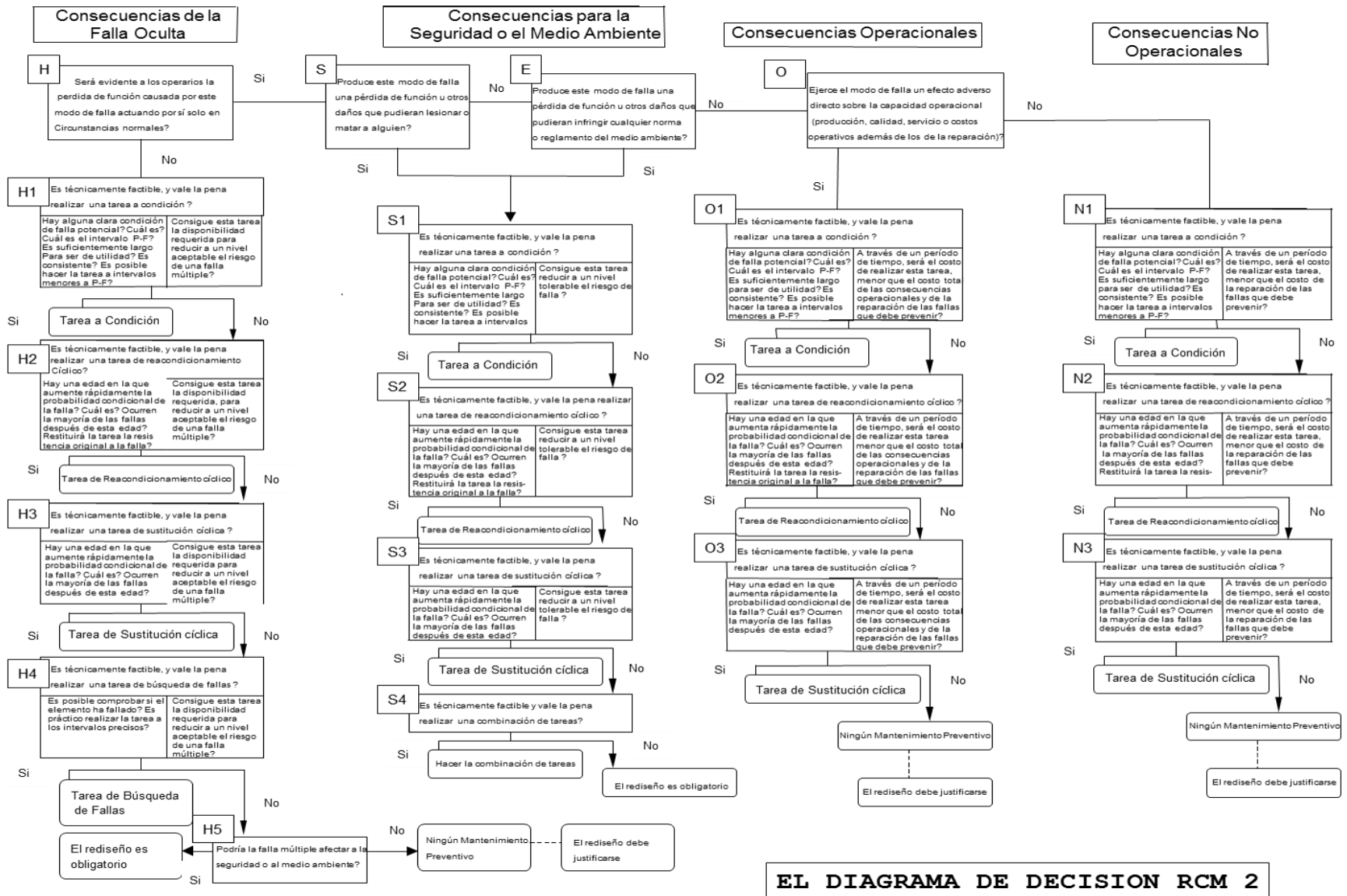


Figura 2. Diagrama de Decisión RCM 2, por Moubray. (1997)

Tabla 6

## Hoja de Decision RCM 2

[illegible]

*Nota.* Hoja de decisión RCM2, adaptado de Moubray (1997)

## **Conclusión**

En el presente trabajo se identificaron los procedimientos aplicados por el personal de mantenimiento industrial de Cerrejón a los equipos de las islas de combustible.

Junto a esto se observó que las tareas de mantenimiento que se desarrolla actualmente son preventivas-predictivas con un alto costo económico que equivale a más de \$5,550 dólares por isla de combustible al año en mano de obra, sin incluir los demás insumos, repuestos, o mantenimientos correctivos efectuados.

Por otro lado, se caracterizó el estado actual de la isla y sus equipos, para lograr obtener la jerarquización y determinar los modos de falla asociados a cada equipo que componen los sistemas de la isla de combustible.

Con toda la información recopilada se desarrolló una guía con la metodología propuesta y sus procedimientos. Se propone unas tablas y herramientas para estandarizar la toma de datos y de esta forma contribuir a que el proceso de implementación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad sea llevado con éxito, y se logre generalizar en todas las islas de la empresa.

La nueva metodología propuesta permite mejorar el plan de mantenimiento actual de la empresa, pues al implementar de manera efectiva se lograría obtener un plan de mantenimiento proactivo basado en la criticidad, junto con un plan optimizado entre costos y beneficios enfocado en la preservación de los requisitos funcionales, selección de tareas basadas en la jerarquía de recursos y basadas en condición antes que basadas en tiempo.

### **Recomendaciones**

Para la implementación de esta práctica en los equipos de las islas de combustible se recomienda cumplir con los siguientes aspectos:

- Apoyar a la superintendencia, analistas, supervisores, operadores y coordinadores de mantenimiento para llevar un buen desarrollo de la práctica.
- Crear un grupo multidisciplinario integrado por personal operativo y de mantenimiento para realizar un trabajo semanal de RCM.
- Entrenar y capacitar al personal para el uso de esta metodología.
- Realimentar el software de gestión de activos Ellipse® con los resultados de RCM y las tareas estándar de cada equipo. Para esto se requiere de una persona de planeación dedicada a esta actividad.
- Establecer cronogramas de cumplimiento de actividades y KPIs.
- Establecer programas de auditorías externas.

## Referencias

[Fotografía de MacAllister]. (Toma de muestra de lubricantes, 2017). Copyright © 2017

MacAllister Machinery Company, Inc. Recuperado de <https://www.macallister.com/parts-service/service-solutions/>

[Fotografías de Insatec electrónica]. (Termografías en Motores, 2017). Copyright © 2017

Insatec electrónica S.L. Recuperado de [http://www.camarastermograficas.es/tig\\_023.htm](http://www.camarastermograficas.es/tig_023.htm)

[Fotografía de Seractivos]. (Mantenimiento autónomo, 2017). Copyright © 2017 Seractivos.

Recuperado de [http://gerencia.seractivos.com/2016/08/18/la-cultura-del-mantenimiento-autonomo/#.WWpZEIg1\\_IU](http://gerencia.seractivos.com/2016/08/18/la-cultura-del-mantenimiento-autonomo/#.WWpZEIg1_IU)

[Fotografía de IARI]. (Servicios de pruebas no destructivas, 2017). Copyright © 2017 IRAI

sureste. Recuperado de <http://iarisureste.com/servicios-pnd/#1493850855341-1581452b-36a6>

[Fotografía de EDICSA]. (Radiografía industrial, 2017). Copyright © 2011 EDICSA sureste.

Recuperado de [http://www.endicsa.com.ar/site/images/imagenes\\_articulos\\_endicsa/rt1.jpg](http://www.endicsa.com.ar/site/images/imagenes_articulos_endicsa/rt1.jpg)

[Fotografía de NTC]. (Pruebas de líquidos penetrantes, 2017). Copyright © 2017 NTC.

Recuperado de [http://www.nihontecocrane.com.mx/wpcontent/uploads/2014/04/liq\\_01.png](http://www.nihontecocrane.com.mx/wpcontent/uploads/2014/04/liq_01.png)

[Fotografía de Global Strategies Solutions]. (Análisis de vibraciones, 2017). Copyright ©

2014 Global Strategies Solutions. Recuperado de <http://globalstrategiessolutions.com/wp-content/uploads/2014/07/analisis-vibraciones.jpg>

[Figura de Editora microbyte]. (Ocho pilares que soportan el sistema TPM, 2011). Copyright

© 2011 Editora microbyte. Recuperado de

<http://www.microbyte.cl/elec/picarti/201012/tpm2.gif>

[Figura de Héctor Angulo]. (Las 5S, 2017). Adaptado de [http://dqsiberica.com/wp-](http://dqsiberica.com/wp-content/uploads/2014/07/esquema-workshop-en-las-5s.jpg)

[content/uploads/2014/07/esquema-workshop-en-las-5s.jpg](http://dqsiberica.com/wp-content/uploads/2014/07/esquema-workshop-en-las-5s.jpg)

[Figura de Ams group]. (Selección de funciones, 2010). Adaptado de Conferencia de

aplicación de RCM Asset management solutions. Copyright © 2010.

[Figura de Smith & Hinchcliffe]. (Age–reliability patterns for nonstructural equipment, 2004).

Copyright © 2004 Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R.

[Figura de Aprendizaje sin fronteras]. (Metodología Análisis de Criticidad, 2001). Copyright

© 2001 Pemex. Guía de Análisis de criticidad, aprendizaje digital.

[Figura de Ams group]. (Probabilidad condicional de falla, 2010). Adaptado de Conferencia

de aplicación de RCM Asset management solutions. Copyright © 2010

[Figura de Ams group]. (Acciones a falta de, 2010). Adaptado de Conferencia de aplicación

de RCM Asset management solutions. Copyright © 2010

[Figura de Digital Globe & Héctor Angulo]. (Complejo minero Cerrejón, 2017). Copyright ©

2017 Google

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Instalaciones de una isla de combustible, 2016). Mina de

Carbones del Cerrejón Limited.

[Figura de Héctor Angulo]. (Isla de combustible, 2012). Adaptado de Plano 75669A-D7210

Carbones del Cerrejón Limited.

[Figura de Héctor Angulo]. (Isométrico patín de lubricación, 2012). Adaptado de Plano

75669A-D7210 Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Patín de lubricación, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Conjunto motor-bomba despacho combustible, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Patín recibo combustible, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Compresor, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Bomba Neumática, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Transferencia automática, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Fotografía de Héctor Angulo]. (Motogenerador, 2016). Mina de Carbones del Cerrejón Limited.

[Figura de ISO]. (Estructura funcional, 2016). Copyright © 2016 ISO 14224

Aguilar-otero, J. R., Torres-arcique, R., Magaña-jiménez, D., Mexicana, C., & Investigación, D. (2010). Failure mode and effects and criticality analysis ( FMECA ) for maintenance planning using risk and safety criteria. *Tecnol. Ciencia*, 15–26.

Baldini, A., Furlentto, L., Roversi, A., & Turco, F. (1975). *Manual de Mantenimiento de Plantas Industriales*. Milano - Italia: F. Angeli, Ed.

Bloom, N. (2006). *Reliability centered maintenance (RCM) : implementation made simple*. New York - USA: McGraw-Hill.

Carnero, M. C., & Gómez, A. (2017). Maintenance strategy selection in electric power distribution systems. *Energy*, 129, 255–272.



<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.100>

Cerrejón. (2017a). CERREJÓN Minería Responsable | Nuestra empresa | Historia. Retrieved

November 20, 2016, from <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/historia.aspx>

Cerrejón. (2017b). CERREJÓN Minería Responsable | Nuestra empresa | Quiénes somos.

Retrieved November 22, 2016, from <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/quienes-somos.aspx>

Cerrejón. (2017c). CERREJÓN Minería Responsable | Nuestra empresa | Quiénes somos.

Retrieved November 21, 2016, from <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa.aspx>

de León, F. C. G. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia.

Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=bOrFC3532MEC>

Fernández, F. J. G. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*.

Fundación Confemetal. Retrieved from

[https://books.google.com.co/books?id=OzwXOAKv\\_QAC](https://books.google.com.co/books?id=OzwXOAKv_QAC)

Fernández, M., Garcia, M., Alonso, G., Cano, J. M., & Solares, J. (1998). *Técnicas para el*

*mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas*. (Boixareu, Ed.). Barcelona:

Marcombo.

Garrido, S. G. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Editorial Diaz de

Santos, S.A. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=PUovBdLi-oMC>

ISO. (2016). BSI Standards Publication Petroleum , petrochemical and natural gas industries

— Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Retrieved

from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14224:ed-3:v2:en>

Montilla, C., Arroyave, J. F., & Silva, C. (2007). Caso de aplicación de mantenimiento

centrado en la confiabilidad RCM, previa existencia de mantenimiento preventivo.

*Scientia et Technica*, (37), 273–278.

Moubray, J. (1997). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. (Industrial Press Inc., Ed.) (Segunda Ed).

Omogbai, O. (2017). The Implementation of 5S Lean Tool Using System Dynamics Approach. *Procedia CIRP*, 60, 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.057>

SAE:JA1011. Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Pub. L. No. JA1011, 1 (1999).

Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., & Desai, S. (2013). Total productive maintenance (TPM) implementation in a machine shop: A case study. *Procedia Engineering*, 51, 592–599. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.084>

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *Rcm - Gateway to world class maintenance*. Butterworth-Heinemann. Elsevier Inc. Retrieved from <http://elsevier.com>

Tavares, L. A. (2000). *Administração Moderna de Manutenção* (Segunda Ed). Novo Pólo Publicações.

Torres, L. D. (2005). *Mantenimiento su Implementacion y Gestion* (Segunda Ed). Universitas.

Yssaad, B., & Abene, A. (2015). Rational Reliability Centered Maintenance Optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 73, 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.015>

Zhang, Y., Andrews, J., Reed, S., & Karlberg, M. (2017). Maintenance processes modelling and optimisation. *Reliability Engineering and System Safety*, (xxxx), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.02.011>

Zio, E. (2007). *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. World Scientific. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=mZOKvnB4eb4C>

## Bibliografía

- Alcides, L. (2009). Rem Mantenimiento Centrado En Confiabilidad” En La Estación 3a De La Superintendencia De Operaciones La Cira Infantas De La Gerencia Regional Del Magdalena Medio Perteneciente a Ecopetrol, 160.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Antonovsky, A., Pollock, C., & Straker, L. (2016). System reliability as perceived by maintenance personnel on petroleum production facilities. *Reliability Engineering and System Safety*, 152, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.03.002>
- Chang, Z., Jia, Q., Yuan, X., & Chen, Y. (2017). Main failure mode of oil-air lubricated rolling bearing installed in high speed machining. *Tribology International*, 112 (2016), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.024>
- Espinosa, R. G., Ramos, L. V., Cabrera, E. Z., Alfonso, P. M. H., Águila, J. G. N., & Hernández, H. (2007). Modificación del alto despeje del tractor YUMZ 6M. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4), 11-16.
- Espinosa, R. G., Águila, J. G., Arzola de la Peña, N., Castellanos, L., Hernández, H., López, L., & Fernández, A. (2005). Evaluación de la fractura por fatiga del cigüeñal de un motor Diésel. *Ingeniería Mecánica*, 8(2), 23-28.
- Heap, H. F., & Nowlan, F. S. (1978). *Reliability Centered Maintenance*. Washington, DC: Dolby Access Press.
- Pabón, D., & Silva, A. (2010). Diseño De Un Plan De Mantenimiento Predictivo Para Generadores Eléctricos En La Industria Hotelera Que Utilizan Fuel Oil Como Combustible.

- Raza, A., & Ulansky, V. (2017). Modelling of Predictive Maintenance for a Periodically Inspected System. *Procedia CIRP*, 59(TESConf 2016), 95–101.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.09.032>
- Sobral, J., & Ferreira, L. A. (2016). Availability of fire pumping systems under periodic inspection. *Journal of Building Engineering*, 8, 285–291.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.09.001>
- Spreafico, C., Russo, D., & Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002>